



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

ANNAKAISA LEHTINEN

SÄHKÖBUSSIT OSANA TURUN SEUDUN JOUKKOLIIKENNE- JÄRJESTELMÄÄ

Diplomityö

Tarkastaja: professori Jorma Mänty-
nen

Tarkastaja ja aihe hyväksytty talou-
den ja rakentamisen tiedekuntaneu-
voston kokouksessa 3. syyskuuta
2014

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Rakennustekniikan koulutusohjelma

LEHTINEN ANNAKAISA: Sähköbussit osana Turun seudun joukkoliikennejärjestelmää

Diplomityö, 123 sivua

Syyskuu 2014

Pääaine: Liikenne- ja kuljetusjärjestelmät

Tarkastaja: professori Jorma Mäntynen

Avainsanat: joukkoliikenne, joukkoliikennejärjestelmä, käyttökonsepti, latausmenetelmä, litiumtitanaattiakku, LTO, sähköbussi, yhdistelmälataus

Tässä diplomityössä tutkitaan sähköbussien käyttöönottoa pilottilinjoilla Turun seudulla. Diplomityö on tehty osana Turun kaupungin ja Siemens Osakeyhtiön kolmevuotista strategista yhteistyötä ja on osa yhteistyöhön sisältyvää tiedonjakoa ja tutkimusta. Diplomityön tavoitteena on löytää soveltuvin käyttökonsepti, latausmenetelmä ja akkutyyppejä sekä Turun seudun potentiaalisin joukkoliikennelinjat sähköbussiliikennöintiin.

Tutkimuksen perusteella Turun seudulla on useita potentiaalisia joukkoliikennelinjoja sähköbussiliikennöintiin. Joukkoliikennelinjat on potentiaalinen sähköbussiliikennöintiin, kun linjan ominaisuudet muodostavat ideaalisen yhdistelmän ja näitä ideaalisia yhdistelmiä on useita. Joukkoliikennelinjojen potentiaalisuutta sähköbussiliikennöintiin tutkitaan diplomityössä myös sähköverkon ja linjan taloudellisen kannattavuuden näkökulmista. Joukkoliikennelinjojen ominaisuuksien, sähköverkon sekä linjojen taloudellisen kannattavuuden perusteella diplomityössä ehdotetaan käynnistettäväksi pilottilinjoiksi linjoja 3 ja 30.

Linjat 3 ja 30 suositellaan sähköistettäväksi yhdistelmälatauskonseptia käyttäen. Yhdistelmälatauskonseptissa sähköbusseja ladataan sekä pikalatauksena operoinnin aikana että varikkolatauksena bussin käyttötaukojen aikana. Yhdistelmälatausta käytettäessä soveltuvin latausmenetelmä varikkolataukseen on kaapelilataus ja operoinnin aikaan pikalataukseen virroitinlataus. Tutkimuksen perusteella litiumtitanaattiakku (LTO) on soveltuvin akkutyyppeistä sähköbussiliikennöintiin.

Tutkimuksessa sähköbussiliikennöinnin suurimpina haasteina nousivat esille liikennöinti kylmissä olosuhteissa, akkujen elinikä ja latausstandardien puuttuminen. Liikennöinti kylmissä olosuhteissa kasvattaa merkittävästi sähköajoneuvojen sähkönkulutusta. Pahimmillaan sähkönkulutus voi kasvaa jopa 100 % kylmissä olosuhteissa liikennöitäessä. Sähköbusseissa käytettävät akut ovat uutta teknologiaa ja tästä johtuen akkujen eliniästä ei ole tarkkaa tietoa. Akkujen elinikä vaikuttaa olennaisesti sähköbussiliikennöinnin taloudelliseen kannattavuuteen. Suurin pikalatauslaitteen hankintaan liittyvä riski on latausstandardien puuttuminen. Asiantuntija-arvioiden mukaan pikalatauslaitteiden standardointi kestää vielä 3-4 vuotta.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Civil Engineering Technology

LEHTINEN ANNAKAISA: Electric buses as part of public transport system in the region of Turku

Master of Science Thesis, 123 pages

September 2014

Major: Transport Systems

Examiner: Professor Jorma Mäntynen

Keywords: charging method, electric bus, lithium-titanate battery, LTO, operating concept, opportunity charging, public transport, public transport system

This thesis researches pilot use of electric busses in the region of Turku. Thesis was made as a part of a three year strategic partnership of Siemens and the city of Turku. This thesis is a part of the research and information sharing of this partnership. The goal of this thesis is to find a suitable charging method, battery type, operating concept and the most potential public transport line for operating with electric busses.

Based on this research there are many potential public transport lines suitable for electric busses in the region of Turku. A public transport line is identified as potential line when the properties of the line form an ideal combination. There can be many different ideal combinations. Economic viability and power grid coverage were also examined for the lines. Public transport lines 3 and 30 were suggested to be pilot lines for the future electric bus operations.

Recommendation is to use opportunity charging on the recommended pilot lines 3 and 30. Opportunity charging uses both depot charging and flash charging during operations. In opportunity charging the battery is charged with a cable while in depot and with a pantograph during daily operations. According to research performed in this thesis lithium-titanate battery is the most suitable battery type for operating with electric buses.

The biggest challenges for operating electric busses were found to be cold conditions, battery lifetime and the lack of charging standards. Operating in cold conditions increases the consumption of electricity remarkably. In worst case scenario the electricity consumption is increased by 100 percent. The batteries used in electric busses are new technology which is why there is no reliable information on battery lifetime. Battery lifetime has a direct impact on economic viability of electric bus operations. The biggest risk on acquiring flash charge equipment is the lack of standards. According to experts flash charge standardization will still take around 3-4 years.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty osana Turun kaupungin ja Siemens Osakeyhtiön kolmevuotista strategista yhteistyötä. Diplomityöprosessiin ovat osallistuneet aktiivisesti tilaajan edustaja sekä kaksi Siemens Osakeyhtiön asiantuntijaa. Diplomityön ohjaajana on toiminut professori Jorma Mäntynen Liikenteen tutkimuskeskus Vernestä, tilaajan edustajana on toiminut Turun joukkoliikennejohtaja Sirpa Korte Turun joukkoliikennetoimistosta ja Siemens Osakeyhtiön asiantuntijoina diplomityöprosessissa ovat olleet Lars Maura ja Tuomas Humalajoki.

Ohjaaja, tilaajan edustaja sekä Siemens Osakeyhtiön asiantuntijat ovat muodostaneet yhdessä diplomityön ohjausryhmän. Ohjausryhmä kokoontui viisi kertaa diplomityöprosessin aikana. Ohjausryhmän rooli on ollut diplomityössä tukea antava ja motivoiva. Ohjausryhmä on avustanut tutkimusaiheen rajauksessa ja antanut hyviä neuvoja tutkimuksen edetessä. Diplomityö on tehty tilaajan tavoitteita ja toiveita kuunnellen. Diplomityön lähteinä on käytetty painettua kirjallisuutta, verkkojulkaisuja ja asiantuntijalähteitä.

Erityinen kiitos diplomityön ohjaajalle Jorma Mäntyselle mahdollisuudesta tämän tutkimuksen tekemiseen sekä luottamuksesta ja motivoinnista diplomityöprosessin aikana. Kiitos diplomityön ohjausryhmälle, avusta tutkimusaiheen rajauksessa sekä neuvoista ja motivoinnista diplomityön edetessä. Kiitos Sirpa Kortelle, Jouko Tervoselle ja Jari Paasikivelle avustamisesta Turun joukkoliikenneverkkoon sekä Turun joukkoliikennetoimiston tavoitteisiin liittyvissä asioissa. Kiitos Lars Mauralle, Tuomas Humalajoelle sekä muille Siemens Osakeyhtiön asiantuntijoille, jotka ovat ystävällisesti opettaneet minulle sähköbussikalustoon ja sähköbussiliikennöintiin liittyviä perusasioita.

Kiitos kaikille diplomityön asiantuntijalähteille. Erityinen kiitos VTT:n tutkijoille Samu Kukkoselle ja Veikko Karvoselle avustamisesta akkuteknologiaan ja latausmenetelmiin liittyvissä asioissa sekä Turku Energian sähköverkkoasiantuntijoille sähköverkon tutkimisesta. Lisäksi haluaisin kiittää mahdollisuudesta osallistua diplomityöprosessin aikana järjestettyihin sähköisen liikenteen seminaareihin ja tapahtumiin. Lopuksi kiitos perheelle ja ystäville sekä erityinen kiitos avopuolisolleni päivittäisestä tuesta ja motivoinnista, vankkumattomasta luottamuksesta sekä läsnäolosta diplomityöprosessin aikana.

28.9.2014

Annakaisa Lehtinen

Tampereen teknillinen yliopisto

puh. 040 867 6694

annakaisa.lehtinen@student.tut.fi

SISÄLLYS

1	Johdanto.....	1
1.1	Työn tausta	1
1.2	Työn tavoitteet ja rajaukset	2
1.3	Tutkimusmenetelmät.....	3
2	Turun seudun joukkoliikenteen nykytila	4
2.1	Turun seudun joukkoliikennetarjonta	4
2.2	Turun seudun joukkoliikenneverkko.....	5
2.3	Turun kaupungin sisäiset joukkoliikennelinjat	8
2.4	Vakiolinjojen muodostama palvelutaso	13
3	Turun seudun joukkoliikenteen kehitys tulevaisuudessa	16
3.1	Kehitykseen vaikuttava lainsäädäntö	16
3.1.1.	Joukkoliikennelaki	16
3.1.2.	Palvelusopimusasetus	17
3.1.3.	Suomen ilmastopolitiikkaa ohjaavat kansainväliset sopimukset	19
3.2	Joukkoliikennejärjestelmän kehitys	23
3.2.1.	Turun kaupungin tavoitteet ja päätökset.....	23
3.2.2.	Runkobussilinjasto.....	24
3.2.3.	Turun raitiotie	29
4	Sähköbussit.....	31
4.1	Perussuureet	31
4.2	Akkutyypit	32
4.3	Latausmenetelmät	37
4.3.1.	Kaapelilataus.....	37
4.3.2.	Virroitinlataus	38
4.3.3.	Induktiolataus.....	40
4.3.4.	Akunvaihtojärjestelmä	40
4.4	Käyttökonseptit	41
4.4.1.	Varikkolataus	41
4.4.2.	Pikalataus	44
4.4.3.	Yhdistelmälataus.....	46

4.5	Markkinoilla oleva kalusto.....	50
4.5.1.	BYD	50
4.5.2.	Caetano Bus	52
4.5.3.	Ebusco.....	53
4.5.4.	Siemens/Rampini	55
4.5.5.	Solaris Bus & Coach.....	56
4.5.6.	VDL Bus & Coach.....	58
4.6	Markkinoilla olevan kaluston vertailu	61
4.7	Sähköbussiliikennöinti kylmissä olosuhteissa	63
5	Sähköbussit Turun seudulla.....	66
5.1	Suositus valittavaksi käyttökonseptiksi, latausmenetelmäksi ja akkutyypiksi	66
5.2	Sähköbussiliikennöinnin kriteerit	68
5.3	Potentiaalisten sähköbussilinjojen valinta.....	71
5.4	Sähköverkko.....	79
5.5	Potentiaalisten sähköbussilinjojen taloudellinen kannattavuus	83
5.6	Ehdotus vaihtoehtoisista pilottilinjoista	86
6	Sähköbussipilotti	87
6.1	Vaihtoehtoiset pilottilinjat.....	87
6.2	Vaihtoehtoisten pilottilinjojen sähköistäminen yhdistelmälatauskonseptia käyttäen	91
6.2.1.	Linja 1H	94
6.2.2.	Linjat 3 ja 30	97
6.2.3	Linjat 4 ja 40	98
6.2.4.	Linja 18.....	100
6.3	Vaihtoehtoisten pilottilinjojen kustannukset.....	102
6.4	Ehdotus käynnistettävistä pilottilinjoista	111
7	Päätelmät	112
	Lähteet.....	116

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

ABS	Antilock Braking System
ASR	Anti-Slip Regulation, voidaan kutsua myös nimellä Traction Control System (TCS)
EBS	Electronically controlled Braking System
ESC	Electronic Stability control System
EU	Euroopan unioni
LFP	Litiumrautafosfaattiakku (LiFePO_4)
Li-ion-akku	Litiumioniakku
Linja 1H	Heilurilinja 1 Lentoasema-Kauppatori-Satama
Linja 1S	Säteislinja 1 Kauppatori-Satama
Linja 61H	Heilurilinja 61 Vienola-Kauppatori-Ilpoinen
Linja 61S	Säteislinja 61 Kauppatori-Ilpoinen
LTO	Litiumtitanaattiakku ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$)
PSA	Euroopan unionin joukkoliikenteen palvelusopimusasetus
TLO	Turun linja-autoilijain Osakeyhtiö
TuKL	Turun Kaupunkiliikenne Oy

KUVALUETTELO

Kuva 1 Turun seutu.	4
Kuva 2 Turun kaupungin sisäisten vakiolinjojen verkko.	7
Kuva 3 Turun kaupungin sisäiset yölinjat.	11
Kuva 4 Turun kaupungin sisäiset palvelulinjat	12
Kuva 5 Turun kaupungin sisäisten vakiolinjojen muodostamat joukkoliikenteen laatukäytävät.	15
Kuva 6 Turun seudun runkobussilinjasto.	26
Kuva 7 Turun raitiotien yleissuunnitelma.	29
Kuva 8 Purku-lataussyklin syvyyden vaikutus akun syklikeston.	34
Kuva 9 Sähköbussioperointi käyttäen varikkolatausta yöllä.	42
Kuva 10 Sähköbussioperointi käyttäen varikkolatausta käyttötauoilla.	43
Kuva 11 Sähköbussioperointi käyttäen pikalatausta.	45
Kuva 12 Esimerkki pikalatauskonseptin toteutumisesta käytännössä.	46
Kuva 13 Sähköbussioperointi käyttäen yhdistelmälatausta. Tarkka kuvaus akkujen varaustason laskusta operoinnin aikana.	47
Kuva 14 Sähköbussioperointi käyttäen yhdistelmälatausta. Kokonaiskuva akkujen varaustason vaihtelusta vuorokauden aikana.	48
Kuva 15 BYD K9 sähköbussin sisätilat.	50
Kuva 16 BYD K9 sähköbussin mahdollinen ulkomuoto.	51
Kuva 17 Cobus 2500 EL sähköbussin mahdollinen ulkomuoto.	53
Kuva 18 Ebusco YTP-1 sähköbussi liikennöimässä Espoossa 4.12.2013.	54
Kuva 19 Alé Electric bussin mahdollinen ulkomuoto.	55
Kuva 20 Solaris Urbino 12 electric bussin mahdollinen ulkomuoto.	57
Kuva 21 Citea Low Floor Electric bussin sisätilat.	59
Kuva 22 Citea Low Floor Electric bussin mahdollinen ulkomuoto.	59
Kuva 23 Potentiaalisten sähköbussilinjojen reitit.	75

Kuva 24 <i>Potentiaalisten sähköbussilinjojen reitit jaoteltuna linjan potentiaalisuuden mukaan.</i>	76
Kuva 25 <i>Potentiaalisten sähköbussilinjojen latauspisteet lataustehoineen kartalla.</i>	80
Kuva 26 <i>Vaihtoehtoiset pilottilinjat.</i>	87
Kuva 27 <i>Yhdistelmä lataus linjalla 1H. Akkujen varaustason vaihtelu arkipäivinä ja lauantaisin LTO-akkua käytettäessä.</i>	95
Kuva 28 <i>Yhdistelmä lataus linjalla 1H. Akkujen varaustason vaihtelu pyhäpäivinä LTO-akkua käytettäessä.</i>	96
Kuva 29 <i>Yhdistelmä lataus linjoilla 3 ja 30 LTO-akkua käytettäessä.</i>	97
Kuva 30 <i>Yhdistelmä lataus linjoilla 4 ja 40. Akkujen varaustason vaihtelu arkipäivinä LTO-akkua käytettäessä.</i>	99
Kuva 31 <i>Yhdistelmä lataus linjoilla 4 ja 40. Akkujen varaustason vaihtelu lauantaisin LTO-akkua käytettäessä.</i>	99
Kuva 32 <i>Yhdistelmä lataus linjoilla 4 ja 40. Akkujen varaustason vaihtelu pyhäpäivinä LTO-akkua käytettäessä.</i>	100
Kuva 33 <i>Yhdistelmä lataus linjalla 18. Akkujen varaustason vaihtelu arkipäivinä ja lauantaisin LTO-akkua käytettäessä.</i>	101
Kuva 34 <i>Yhdistelmä lataus linjalla 18. Akkujen varaustason vaihtelu pyhäpäivinä LTO-akkua käytettäessä.</i>	102

TAULUKKOLUETTELO

<i>Taulukko 1 Seudullisten vakiolinjojen reitit.</i>	<i>6</i>
<i>Taulukko 2 Turun kaupungin sisäiset vakiolinjat.</i>	<i>8</i>
<i>Taulukko 3 Palvelutasomäärittelyn kriteerit.....</i>	<i>10</i>
<i>Taulukko 4 Kansalliset ja kansainväliset päästövähennystavoitteet sekä nykyinen ja tavoiteltava uusiutuvan energian osuus energian kokonaiskulutuksesta.</i>	<i>22</i>
<i>Taulukko 5 Runkobussilinjaston toteutumisen ansiosta tapahtuvat nykyisten joukkoliikennelinjojen palvelutasoparannukset.</i>	<i>27</i>
<i>Taulukko 6 Sähköbussin perussuureet.</i>	<i>31</i>
<i>Taulukko 7 LFP- ja LTO-akkujen ominaisuudet.....</i>	<i>35</i>
<i>Taulukko 8 Yhdistelmä latauskonseptin kymmenessä variaatiossa tapahtuvat muutokset verrattuna kuvassa 14 esitettyyn vaihtoehtoon.</i>	<i>49</i>
<i>Taulukko 9 BYD K9 sähköbussin tekniset tiedot.....</i>	<i>51</i>
<i>Taulukko 10 Cobus 2500 EL sähköbussin tekniset tiedot.</i>	<i>52</i>
<i>Taulukko 11 Ebusco YTP-1 sähköbussin tekniset tiedot.....</i>	<i>54</i>
<i>Taulukko 12 Alé Electric bussin tekniset tiedot.</i>	<i>56</i>
<i>Taulukko 13 Solaris Urbino electric bussien tekniset tiedot.</i>	<i>58</i>
<i>Taulukko 14 Citea Low Floor Electric bussin tekniset tiedot.....</i>	<i>60</i>
<i>Taulukko 15 Sähköbussien tekniset tiedot.....</i>	<i>61</i>
<i>Taulukko 16 Ajo-olosuhteiden, lämpötilan, ilmastoinnin ja sisäilman lämmityksen vaikutukset RekkEVIDde-hankkeessa tutkittujen sähköautojen sähkönkulutukseen ja ajomatkaan.....</i>	<i>65</i>
<i>Taulukko 17 Turun seudun joukkoliikennejärjestelmää koskevat sähköbussiliikennöinnin kriteerit ja niiden painoarvot.</i>	<i>68</i>
<i>Taulukko 18 Potentiaalisten sähköbussilinjojen valinnan perusteena oleva pisteytysjärjestelmä.....</i>	<i>72</i>
<i>Taulukko 19 Ehdottomat kriteerit täyttävät joukkoliikennelinjat.</i>	<i>73</i>
<i>Taulukko 20 Potentiaalisten sähköbussilinjojen latauspisteet.</i>	<i>79</i>
<i>Taulukko 21 Sähkö- ja dieselbussiliikennöinnin kustannukset.</i>	<i>84</i>

<i>Taulukko 22</i> <i>Potentiaalisten sähköbussilinjojen hankinta- ja liikennöintikustannukset.</i>	84
<i>Taulukko 23</i> <i>Vaihtoehtoisten pilottilinjojen linjakohtaiset ominaisuudet.</i>	89
<i>Taulukko 24</i> <i>Vaihtoehtoisten pilottilinjojen sähköistämiseen tarvittavat tiedot.</i>	93
<i>Taulukko 25</i> <i>Sähkö- ja dieselbussiliikennöinnin kustannukset.</i>	104
<i>Taulukko 26</i> <i>Sähköbussipilotin aloituskustannukset vaihtoehtoisilla pilottilinjoilla...</i>	105
<i>Taulukko 27</i> <i>Vuosittaiset liikennöintikustannukset vaihtoehtoisilla pilottilinjoilla tilanteessa, jossa linjalla liikennöi vain yksi sähköbussi.</i>	106
<i>Taulukko 28</i> <i>Vaihtoehtoisten pilottilinjojen hankinta- ja liikennöintikustannukset sekä sähkö- että dieselbussiliikennöintiä käytettäessä.</i>	108

1 JOHDANTO

1.1 Työn tausta

Sähköbussien määrä maailmalla on lisääntymässä ja sähköbussien käyttöönotosta ollaan kiinnostuneita myös Suomessa. Sähköbusseja halutaan käyttöönottaa, koska dieselbussien korvaaminen sähköbusseilla parantaa kaupunkien ilmanlaatua ja vähentää melua. Lisäksi sähköbussiliikennöinnin liikennöintikustannukset ovat huomattavasti dieselbussiliikennöinnin liikennöintikustannuksia alhaisemmat. Sähköbussien yleistymistä Suomessa vauhdittaa myös Liikenne ja viestintäministeriön esitys, jonka mukaan sähkön osuus kaupunkien bussi- ja jakeluliikenteessä on oltava vähintään 70 prosenttia vuonna 2050 (LVM 2013).

Nykyään maailman laajin sähköisen joukkoliikenteen verkko on Shenzhenin kaupungissa Kiinassa. Vuoden 2012 lopussa Shenzhenin kaupungissa liikennöi 279 sähköbussia ja näiden lisäksi kaupungissa liikennöi 1771 hybridibussia. Tavoitteena on, että vuonna 2015 Shenzhenin kaupungissa liikennöi 5000 sähköbussia. Sähköbusseja on liikennöinnissä paljon myös muissa Kiinan kaupungeissa ja yhteensä Kiinassa liikennöi vuonna 2013 yli 3000 sähköbussia. (Plugincars 2012; South China Morning Post 2014; Teknologiateollisuus 2013)

Sähköbussiliikennöinnin saralla Eurooppa on selvästi Kiinan kehitystä jäljessä. Euroopassa sähköbusseja on karkean arvion mukaan liikennöinnissä alle 100. Euroopassa sähköbusseja on liikennöinnissä ainakin Wienin kaupungissa Itävallassa, Milton Keynesin kaupungissa Iso-Britanniassa sekä Cesenan, Forlín ja Rooman kaupungeissa Italiassa. Lisäksi sähköbussikokeiluja on käynnissä ainakin Iso-Britanniassa (Lontoo), Puolassa (Krakova, Varsova), Ruotsissa (Tukholma, Göteborg), Saksassa (Hampuri), Suomessa (Espoo), Sveitsissä (Geneve) ja Tanskassa (Kööpenhamina). (Jukka Mäkinen 2014; Inkiläinen, E., Sinisalo, M. & Tiuhonen, T. 2013; Seminaari 2014; Siemens)

Suomessa sähköbussiliikennöinnin kehitys on Euroopan tasoa. Turun kaupungin lisäksi sähköbussiliikennöinnistä ollaan kiinnostuneita ainakin Espoossa, Hyvinkäällä, Lahdessa, Porvoossa ja Tampereella. Espoon kaupunki on toiminut syksystä 2012 lähtien sähköisen joukkoliikenteen koekenttänä kansallisessa eBus-hankkeessa, jossa tutkitaan sähköbussien soveltuvuutta Suomen haastaviin talviolosuhteisiin. eBus-hankkeessa ovat mukana muun muassa HSL, Veolia Transport Finland Oy, Fortum Oy, Liikenne- ja viestintäministeriö, Tekes, Työ- ja elinkeinoministeriö, VTT, Aalto yliopisto, Metropolia Ammattikorkeakoulu ja Espoon kaupunki. Espoossa on tällä hetkellä liikennöinnissä BYD, Caetano Bus, Ebusco ja VDL Bus & Coach yritysten valmistamat sähköbussit. Sähköbusseja liikennöi Veolia Transport Finland Oy. (HSL 2012; Samu Kukkonen & Veikko Karvonen 2014)

Hyvinkäällä Reissu Ruodin sähköbussi oli kesällä 2013 kuukauden liikennöinnissä asuntomessuilla. Lahdessa on tehty keväällä 2014 selvitys Lahden keskustan joukkoliikennelinjastosta ja tutkimuksessa on selvitetty myös mahdollisuutta sähköbussin käyttöönotolle. Porvoossa Siemens/Rampini-sähköbussi liikennöi heinäkuussa 2013 kolme viikkoa ilmaisella turistilinjalla kaupungin keskustassa. Tampereella TTY:n sähkötekniikan laitoksella Joni Markkula tekee parhaillaan tutkimusta sähköbussien käyttöönotosta Tampereen seudulla. (Alanne, V. 2014; E-move; Inkiläinen, E., Sinisalo, M. & Tiihonen, T. 2013; Suhonen, K. 2014)

Turussa sähköbussiliikennöintiin saatiin ensikosketus heinäkuussa 2013, kun Siemens/Rampini-sähköbussi oli testikäytössä Turussa tavallisessa linjaliikenteessä 23.–28.7. Sähköbussi liikennöi linjalla 1 Kauppatori-Satama välillä erillisen aikataulun mukaisesti noin 7 km pituista reittiä. Syksyllä 2013 Turun kaupunginhallitus päätti, että Turun seudun joukkoliikenteessä tullaan jatkossa priorisoimaan sähkö- ja hybridikalustoa. Tämä diplomityö käynnistettiin edellisen päätöksen pohjalta tammikuussa 2014. Turussa sähkö nähdään hyvänä voimanlähteenä sekä ympäristön että matkustusmukavuuden kannalta. (Siemens; Turun kaupunki 2013 c)

1.2 Työn tavoitteet ja rajaukset

Tässä diplomityössä tutkitaan sähköbussien käyttöönottoa pilottilinjoilla Turun seudulla. Tutkimus toteutetaan tilanteessa, jossa sähköbusseja ei ole linjaliikennöinnissä Turun seudulla eikä niille tarvittavaa latausinfrastruktuuria ole olemassa. Diplomityössä keskitytään tutkimaan sähköbussiliikennöinnin toteuttamisen vaihtoehtoja ja pyritään löytämään Turun seudun potentiaalisin joukkoliikennelinjat sähköbussiliikennöintiin. Työ ei tarjoa koko Turun seudun joukkoliikennejärjestelmää kattavaa sähköbussiliikennöinnin suunnitelmaa, vaan mahdollistaa sähköbussiliikennöinnin aloittamisen pilottimaisesti Turun seudulla.

Diplomityö on tehty osana Turun kaupungin ja Siemens Osakeyhtiön kolmevuotista strategista yhteistyötä ja on osa yhteistyöhön sisältyvää tiedonjakoa ja tutkimusta. Turun kaupungilla on diplomityön kanssa samanaikaisesti käynnissä Turun raitiotien yleissuunnitelman laadinta. Päätöstä Turun raitiotien toteuttamisesta ei saada tämän diplomityön kannalta tarpeeksi ajoissa, joten diplomityö toteutetaan itsenäisenä ja Turun raitiotiehankkeen toteutumispäätöksestä riippumattomana työnä.

Tutkimuksen pääongelma on sähköbussiliikennöinnin toteutus Turun seudun joukkoliikennejärjestelmässä. Diplomityön tavoitteena on tarjota tietoa sähköbusseissa käytettävistä akkutyypeistä, mahdollisista latausmenetelmistä, sähköbussien käyttökonsepteista, markkinoilla olevasta sähköbussikalustosta sekä sähköbussiliikennöinnistä kylmissä olosuhteissa. Työssä pyritään löytämään soveltuvin käyttökonsepti, latausmenetelmä ja akkutyyppi sekä Turun seudun potentiaalisin joukkoliikennelinjat sähköbussiliikennöintiin. Tavoitteena on, että diplomityön perusteella pystytään tekemään päätös

sähköbussien käyttöönotosta Turun seudun joukkoliikennejärjestelmässä sekä käynnistämään sähköbussipilotti Turun seudulla.

Tutkimuksessa rajoitutaan tarkastelemaan Turun seudun nykyisen joukkoliikennejärjestelmän sekä sen kehityksen tarjoamia mahdollisuuksia sähköbussien käyttöönotolle. Diplomityössä Turun seudulla tarkoitetaan aluetta, joka kattaa Kaarinan, Liedon, Naantalin, Raision, Ruskon ja Turun alueet. Sähköbusseilla tarkoitetaan linja-autoja, joiden käyttövoimana on sähkö ja energiavarastona akut. Diplomityö on rajattu koskemaan pelkästään julkisen linja-autoliikenteen verkkoa. Diplomityössä keskitytään tutkimaan Turun kaupungin sisäisiä joukkoliikennelinjoja ja jätetään seudullisten linjojen tutkiminen vain maininnan tasolle. Diplomityö ei ota kantaa sähköbussiliikennöinnin kilpailuttamiseen, eikä sähköbussikaluston ja latausinfrastruktuurin omistukseen.

1.3 Tutkimusmenetelmät

Diplomityön pääongelmaan etsitään vastauksia kirjallisuudesta sekä alan asiantuntijoilta. Diplomityön alussa kirjallisuustutkimus on suuressa roolissa, mutta työn edetessä asiantuntijoiden rooli korostuu. Työn lopussa kirjallisuudesta ja alan asiantuntijoilta opittua tietoa sovelletaan käyttökonseptin, latausmenetelmän, akkutyypin ja potentiaallisten sähköbussilinjojen valinnassa, joukkoliikennelinjojen sähköistämisen suunnittelussa sekä kustannuslaskelmissa.

Turun seudun joukkoliikenteen nykytila ja sen kehitys tulevaisuudessa – luvut on tehty kokonaan kirjallisuustutkimuksena. Kirjallisuutena on käytetty muun muassa Euroopan komission, Euroopan unionin, Liikenne- ja viestintäministeriön, Turun kaupungin ja Valtioneuvoston kanslian verkkojulkaisuja sekä Turun seudun joukkoliikennejärjestelmää koskevia tutkimuksia. Tutkittaessa Turun seudun joukkoliikenteen kehitystä tulevaisuudessa on kirjallisuutena käytetty myös joukkoliikennelakia.

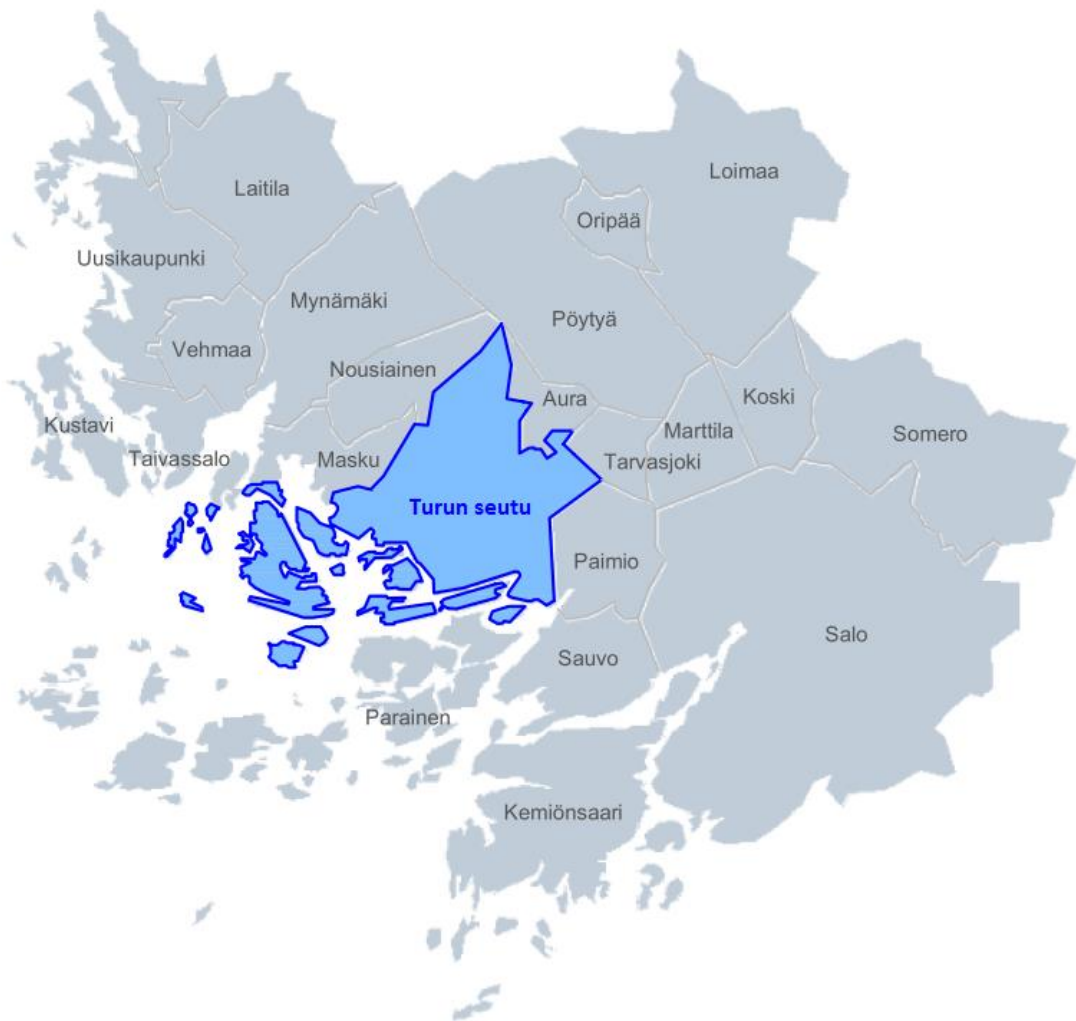
Sähköbussit – luvussa esitetyn teorian lähteinä on käytetty lähinnä alan asiantuntijoita sekä kalustovalmistajien verkkomateriaalia. Asiantuntijoina ovat toimineet ABB Osakeyhtiöstä Jukka Mäkinen, Siemens Osakeyhtiöstä Tuomas Humalajoki ja VTT:ltä Samu Kukkonen ja Veikko Karvonen. Lähteinä on lisäksi käytetty asiantuntijoilta saatua julkaisematonta materiaalia. Sähköbussiliikennöinti kylmissä olosuhteissa – luvun lähteinä on käytetty RekkEVIDde-hankkeen verkkomateriaalia sekä TransEco-tutkimusohjelman tiedotteita.

Sähköbussit Turun seudulla ja sähköbussipilotti – luvuissa on sovellettu kirjallisuudesta ja alan asiantuntijoilta opittua tietoa. Sähköverkon tutkimisessa on hyödynnetty Turku Energian sähköverkkoasiantuntijoiden osaamista. Yhteyshenkilönä sähköverkkosasioissa on toiminut Turku Energia Sähköverkot Osakeyhtiön verkkopäällikkö Arto Ahonen. Joukkoliikennelinjojen ominaisuudet, kuten autojen määrä, operointisäde ja kääntöaika, on tutkittu joukkoliikennelinjojen aikatauluista. Linjojen ominaisuuksia on käytetty diplomityön kustannuslaskelmien perusteena.

2 TURUN SEUDUN JOUKKOLIIKENTTEEN NYKYTILA

2.1 Turun seudun joukkoliikennetarjonta

Turun seudun joukkoliikennetarjonnasta vastaa Turun kaupunki, joka toimii joukkoliikenteen toimivaltaisena seudullisena lupaviranomaisena Turun seudulla. Toimivaltainen seudullinen lupaviranomainen perustettiin 1.1.2012. Yhteisen joukkoliikenneviranomaisen perustamisen myötä joukkoliikenne muuttui kuntien yhdessä järjestämäksi 1.7.2014. Siitä lähtien Turun kaupunki on vastannut toimivaltaisena seudullisena lupaviranomaisena sekä Turun kaupungin sisäisen että Kaarinan, Liedon, Naantalin, Raision ja Ruskon seutuliikenteen järjestämisestä. Turun naapurikunnista kuntien yhdessä järjestämän joukkoliikenteen ulkopuolelle jäävät Aura ja Parainen. (Palvelutasomäärittely 2011; Turun kaupunki 2014 a; Turun kaupunki 2012 c) Kuvassa 1 on esitetty sinisellä Turun seutu.



Kuva 1 Turun seutu. (Paikkatietoikkuna; Turun kaupunki 2014 a; Varsinais-Suomi)

Kuntien yhdessä järjestämä seudullinen joukkoliikenne mahdollistaa joukkoliikennematkustamisen kuuden kunnan sisällä (Kaarina, Lieto, Naantali, Raisio, Rusko, Turku) samoilla lipputuotteilla sekä samalla hinnalla. Turun seudulla on myös käytössä samat ikärajat ja alennusryhmät. Kertalippu maksaa 3 € ja alennuksiin ovat oikeutettuja lapset, nuoret, opiskelijat, eläkeläiset ja invalidit. Lapsen ikäraja on 14 vuotta ja nuori-alennukseen ovat oikeutettuja 15–19-vuotiaat. Maksutta saavat matkustaa sotaveteraanit ja lasta lastenvaunuissa tai –ratissa kuljettava. Turun seudulla on käytössä kahden tunnin vaihto-oikeus kertalipulla tai arvokortilla matkustettaessa. (Turun kaupunki 2014 a)

Kaikilla Turun seudun joukkoliikennelinjoilla liikennöidään matalalattiaisilla linja-autoilla. Linja-autoissa on mahdollisuus lastenvaunujen kuljettamiseen sekä erikseen varatut paikat näkövammaisille ja liikuntarajoitteisille. Matalalattia-autoissa on myös invasilta. (TLO 2014; Turun kaupunki 2012 c) Linjoilla 6 ja 7 liikennöidään täysin uudella ilmastoidulla kalustolla ja muusta seutuliikenteestä noin puolet ajetaan tällä uudella kalustolla. (Turun kaupunki 2014 a)

Joukkoliikenteen palvelupiste löytyy Turun seutuun kuuluvista kaikista kuudesta kunnasta. Turussa ja Kaarinassa palvelupisteitä on kaksi. Joukkoliikenteen bussikorttien myyntiin, lataukseen ja neuvontaan liittyvissä asioissa joukkoliikenteen käyttäjä voi asioida missä tahansa näistä kahdeksasta palvelupisteestä, jotka sijaitsevat Turussa Aurakatu 5 ja Skanssinkatu 10, Kaarinassa Lautakunnankatu 7 ja Hadvalantie 9, Naantalissa Käsityöläiskatu 2, Liedossa Kirkkotie 13, Ruskolla Vanhatie 4 ja Raisiossa Eeronkuja 2. Palvelupisteiden lisäksi bussikortteja on mahdollista ladata Turun kaupunginkirjastolla, Stockmannilla, Sokos Wiklundilla, busseissa sekä internetissä. (Kesäaikataulut; Turun kaupunki 2014 a)

Turun kaupunki järjestää Turun seudun julkiset linja-autoliikennepalvelut tilaaja-tuottaja-mallin mukaisesti. Tilaajana toimii Turun kaupungin joukkoliikennetoimisto, joka suunnittelee linja-autojen reitit ja aikataulut. Joukkoliikennettä tuottavat liikennöitsijät valitaan kilpailutuksen kautta. (Turun kaupunki 2013 a; Turun kaupunki 2012 c) Tällä hetkellä Turun seudun joukkoliikennelinjoista 81 % ajetaan yksityisten bussiyri-tysten ja 19 % kaupungin oman liikenneyhtiön (Turun kaupunkiliikenne Oy/TuKL) toimesta. Liikennöitsijöinä Turun seudulla toimivat Oy Andersson Ab, Länsilinjat Oy, LS-Liikennelinjat Oy, SL-Autolinjat, Turun kaupunkiliikenne Oy, Turun Linja-autoilijain Osakeyhtiö (TLO) ja V-S Bussipalvelut Oy. (Kesäaikataulut)

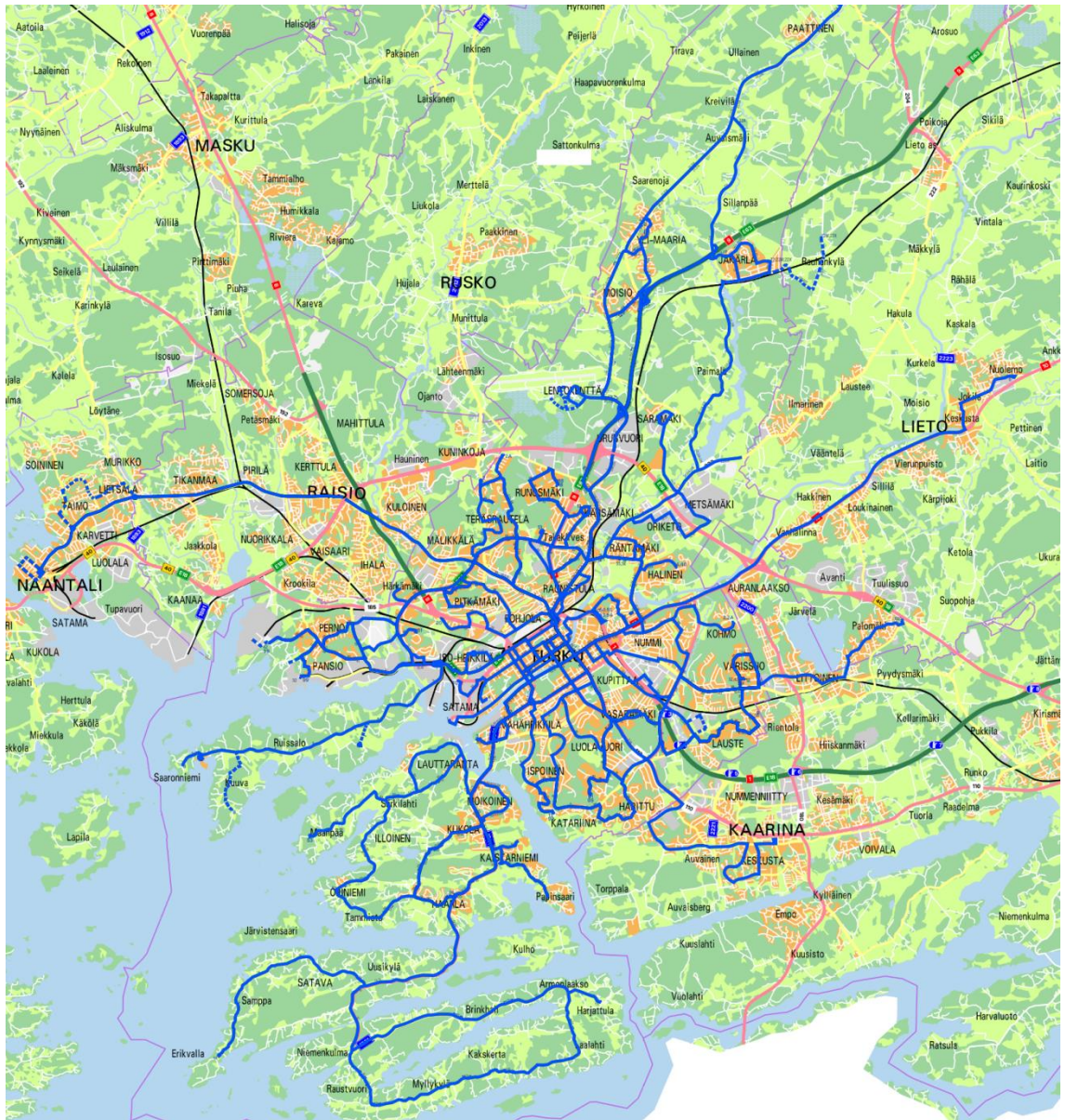
2.2 Turun seudun joukkoliikenneverkko

Turun seudun joukkoliikenneverkko koostuu 90 joukkoliikennelinjasta. Linjoista 58 on vakiolinjoja, 6 yölinjoja, 6 työmatkalinjoja, 15 koululaislinjoja, 3 palvelulinjoja ja 2 tarpeen mukaan liikennöiviä linjoja. Joukkoliikennelinjoista 67 on Turun kaupungin sisäisiä linjoja ja 23 seudullisia linjoja. Seudullisista linjoista 17 on vakiolinjoja ja 6 koululaislinjoja. Turun kaupungin sisäisistä linjoista 41 on vakiolinjoja ja 9 koululais-

linjoja. Lisäksi kaikki yölinjat, työmatkalinjat, palvelulinjat ja tarpeen mukaan liikennöivät linjat ovat Turun kaupungin sisäisiä. (Kesäaikataulut) Taulukossa 1 on esitetty seudullisten vakiolinjojen reitit ja kuvassa 2 Turun kaupungin sisäisten vakiolinjojen verkko.

Taulukko 1 Seudullisten vakiolinjojen reitit. (Kesäaikataulut)

201	Kauppatori-Naantalin pikatie-Kaanaa-Naantali
203	Kauppatori-Naantalin pikatie-Kaanaa-Naantali-Velkua
206	Kauppatori-Raisio-Kaanaa
220	Ylioppilaskylä-Kauppatori-Ihala-Mylly-Länsinummi
221	Kaarina-Skanssi-Kauppatori-Ihala-Mylly-Länsinummi
300	Kauppatori-Kuninkoja-Mylly
301	Kauppatori-Kuninkoja-Rusko
302	Kauppatori-Kuninkoja-Rusko-Vahto
303	Kauppatori-Kuninkoja-Rusko-Vahto
401	Ilmarinen-Kauppatori
402	Lieto asema-Ilmarinen-Kauppatori
403	Aura-Lieto asema-Ilmarinen-Kauppatori
404	Oripää-Pöytyä-Aura-Lieto asema-Ilmarinen-Kauppatori
600	Littoinen-Vaala-Kauppatori-Suikkila
K1	Auranlaakso-Oskarinaukio
R1	Petäsmäki-Kaanaa (liikennöi vastapäivään)
R2	Petäsmäki-Kaanaa (liikennöi myötäpäivään)



Kuva 2 Turun kaupungin sisäisten vakiolinjojen verkko. (Opaskartta)

Turun kaupungin sisäisistä vakiolinjoista kolme liikennöi Turun kaupungin rajojen ulkopuolelle. Näitä linjoja ovat 6, 7 ja 60. Linja 6 liikennöi reittiä Naantali-Raisio-Kauppatori-Lieto, linja 7 reittiä Naantali-Raisio-Kauppatori-Kaarina ja linja 60 liikennöi Vaalasta Littoisiin linjanumerolla 600. Näin ollen Turun kaupungin sisäisten vakio-
linjojen verkko kattaa Turun keskustan ja alakeskusten lisäksi myös Kaarinan, Liedon, Naantalin ja Raision kuntakeskukset. Verkko kattaa myös kuvan 2 ulkopuolelle jäävistä alueista Pohjois-Turussa sijaitsevan Tortinmäen. Linjat 21 ja 23 liikennöivät Tortinmäkeen Paattistentietä ja Säskyläntietä pitkin. (Kesäaikataulut; Opaskartta)

Turun kaupungin sisäiset vakiolinjat muodostavat 450 kilometriä pitkän joukkoliikenneverkon. Lisäksi yölinjat (123 km), työmatkalinjat (123 km), koululaislinjat (121 km), palvelulinjat (65 km) ja tarpeen mukaan liikennöivät linjat (10 km) muodostavat 440 km joukkoliikenneverkkoa. Kokonaisuudessaan Turun kaupungin sisäisen joukkoliikenneverkon laajuus on 890 km. Turun kaupungin sisäisestä joukkoliikenneverkosta

51 % muodostuu vakiolinjoista ja 49 % yö-, työ-, koululais- ja palvelulinjoista sekä tarpeen mukaan liikennöivistä linjoista. (Kesäaikataulut; Opaskartta; Paikkatietoikkuna; Toimintakertomus 2012)

2.3 Turun kaupungin sisäiset joukkoliikennelinjat

Turun kaupungin sisäisiä joukkoliikennelinjoja on 67. Linjoista 41 on vakiolinjoja, 6 yölinjoja, 6 työmatkalinjoja, 9 koululaislinjoja, 3 palvelulinjoja ja 2 tarpeen mukaan liikennöiviä linjoja. Vakiolinjoista kaksi on keskustan ulkopuolella liikennöiviä poikittaislinjoja ja 39 keskustaan suuntautuvia, keskustasta lähteviä tai keskustan läpi liikennöiviä säteis-, heiluri- tai rengaslinjoja, joiden solmukohtana toimii Kauppatori. Vakio-
linjat liikennöivät päivittäin vakioaikatauluilla ja ovat osa kaikille avointa julkista henkilöliikennettä. (Kesäaikataulut; Opaskartta; Turun kaupunki 2013 b)

Poikittaislinjoja ovat linjat 88 ja 99. Poikittaislinja 88 liikennöi Runosmäestä Kärämäen, Takakirveen ja Länsikeskuksen kautta Nättinummeen ja poikittaislinja 99 Pernon telakalta Pansion, Pernon, Länsikeskuksen, Takakirveen, Röntämäen, Nummen, Varissuon, Lausteen ja Skanssin kautta Uittamolalle ja Ilpoisiin. Linja 88 liikennöi maanantaista lauantaihin kerran tunnissa aamu kahdeksan ja ilta kahdeksan välillä. Linja 99 liikennöi maanantaista perjantaihin kahdesti tunnissa aamu viiden ja ilta yhdeksän välillä ja lauantaisin kerran tunnissa aamu kahdeksan ja ilta seitsemän välillä. (Opaskartta; Turun kaupunki 2013 b)

Säteis-, heiluri- tai rengaslinjoja ovat linjat 1, 2, 2A, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 12, 13, 14, 15, 18, 20, 21, 21A, 21B, 22, 22A, 22B, 22M, 22X, 23, 23A, 23B, 30, 32, 32A, 40, 42, 50, 51, 53, 54, 55, 56, 60 ja 61. (Kesäaikataulut; Opaskartta) Taulukossa 2 on esitetty kaikki Turun kaupungin sisäiset vakiolinjat (poikittaislinjat sekä säteis-, heiluri- ja rengaslinjat) ja taulukossa 3 palvelutasomäärittelyn kriteerit. Taulukkoon 2 on koottu vakiolinjojen liikennöintiväli, linjapituus, ajoaika, liikennöintiaika, vuoroväli ja palvelutaso. Linjapituudet on laskettu taulukkoon 0,5 kilometrin tarkkuudella ja ajoaikana on käytetty linjan aikataulussa ilmoitettua arvioitua ajoaikaa.

Taulukko 2 Turun kaupungin sisäiset vakiolinjat. (Kesäaikataulut; Opaskartta; Paikkatietoikkuna; Toimintakertomus 2012; Turun kaupunki 2013 b)

Linja / linjatyyppe	Liikennöintiväli	Linjapituus (km)	Ajoaika (min)	Liikennöintiaika	Vuoroväli ruuhka/pyhä	Palvelutaso
2, 2A / heilurilinja	Kohmo-Kauppatori	6	20	5:20-23:45 +y	10 / 20	II
	Kauppatori-Länsinummi/Liljalaakso	6,5	20	5:20-23:45 +y	10 / 20	II
6, 7 / heilurilinja	Naantali-Raisio-Kauppatori	17	40	5:00-3:00	10 / 30	II
18 / heilurilinja	Runosmäki-Kauppatori	6,5	20	5:15-23:50 +y	7,5 / 20	II
	Kauppatori-Harittu	7	20	5:15-23:50 +y	7,5 / 20	II
32, 42 / heilurilinja	Varissuo-Kupittaaan asema-Kauppatori	8,5	26	5:15-23:45 +y	10 / 20	II
	Kauppatori-Pansio/Perno	9,5-10	24-27	5:10-23:50 +y	10 / 20	II

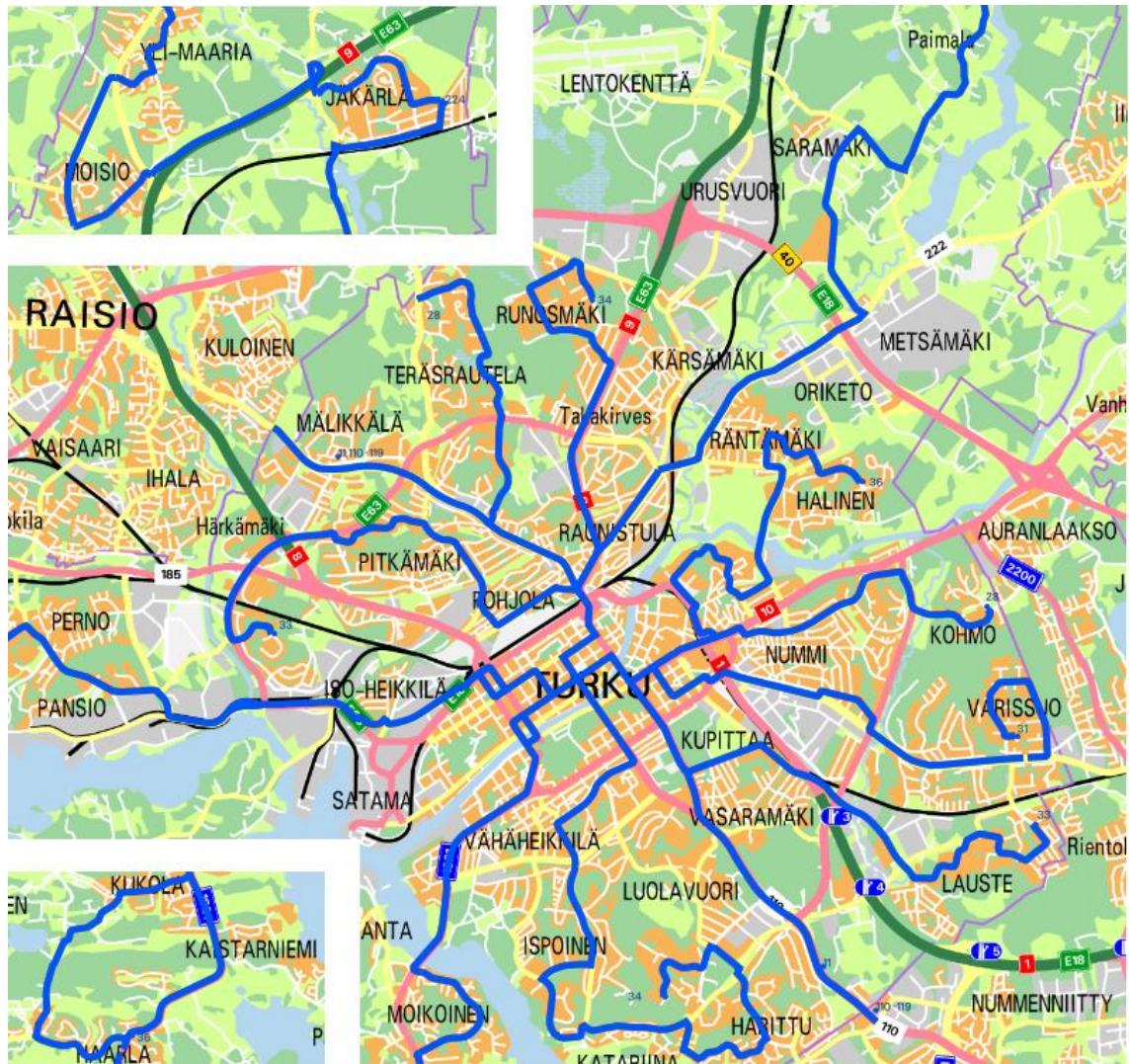
1 / heilurilinja	Satama-Kauppatori	3,5	12	5:25-23:30	10 / 30	III
	Kauppatori-Lentoasema	9	20	5:20-00:50	20 / 30	III
4, 40 / heilurilinja	Halinen-Kauppatori	5	17	5:20-23:35 +y	15 / 30	III
	Kauppatori- Amiraalistonkatu/Huolinta katu	3-3,5	13	5:20-23:45	15 / 30	III
13 / heilurilinja	Takakirves-Kauppatori	5,5	15	5:25-23:15	15 / 40	III
	Kauppatori-Uittamo	7	23	5:15-23:45 +y	15 / 40	III
50, 51, 53, 54 / heilurilinja	Moikoinen-Kauppatori	6,5	16	5:40-23:30 +y	15 / 20	III
	Kauppatori-Ylioppilaskylä	4	15	5:20-23:45 +y	15 / 30	III
3, 30 / rengaslinja	Majakkaranta-Kauppatori- Majakkaranta	9	34	5:25-23:30	20 / 40	IV
6 / heilurilinja	Lieto-Kauppatori	14	35	5:10-00:30	20 / 60	IV
7 / heilurilinja	Kaarina-Kauppatori	13,5	35	5:15-1:00	20 / 60	IV
9 / heilurilinja	Vaala-Skanssi- Kauppatori	8,5	25	5:10-23:30	20 / 60	IV
	Kauppatori-Katariina	7,5	23	5:35-23:45 +y	20 / 60	IV
12 / heilurilinja	Varissuo-Kauppatori	9,5	26	5:35-23:40	30 / 60	IV
	Kauppatori-Härkämäki	6,5	18	5:20-23:30	30 / 60	IV
14, 15 / heilurilinja	Saramäki-Kauppatori	15	30	5:30-23:30 +y	30 / 60	IV
	Kauppatori-Kaivoinen	12,5	26	5:25-23:55	30 / 60	IV
20 / säteislinja	Muhkuri-Kauppatori	6	18	5:20-23:25	20 / 40	IV
21, 21A, 21B, 23, 23A, 23B /säteislinja	Yli-Maaria-Moisio- Kauppatori	13-14,5	25-30	5:30-22:50 +y	20 / 60	IV
22, 22A, 22B, 22M, 22X / säteislinja	Jäkärä-Kauppatori	14,5-16	30-35	5:35-23:30 +y	20 / 60	IV
60 / heilurilinja	Vaala-Kauppatori	7,5	25	5:20-23:45 +y	20 / 60	IV
	Kauppatori-Suikkila	6	20	5:20-23:30 +y	20 / 60	IV
61 / heilurilinja	Ilpoinen-Kauppatori	5,5	20	5:15-23:35 +y	15 / 60	IV
	Kauppatori-Vienola	7,5	24	5:30-23:45 +y	30 / 60	IV
8 / säteislinja	Ruissalo-Rautatieasema- Kauppatori	12	25	5:40-00:00	60 / 60	V
32A / säteislinja	Varissuo-Kauppatori	9	25	6:15-8:45 / 14:35-16:45	20-60 / ei lähtöjä	V
55, 56 / heilurilinja	Räntämäki- Emmauksenkatu- Kauppatori	5,5	20	5:55-18:00	20 / ei lähtöjä	V
	Kauppatori-Haarla	12,5	21	5:05-18:00	20 / ei lähtöjä	V
88 / poikittaislinja	Länsikeskus-Runosmäki	17	40	7:45-19:55	60 / ei lähtöjä	V
99 / poikittaislinja	Perno/Pansio- Ilpoinen/Uittamo	30	76	5:15-21:00	30 / ei lähtöjä	V

Taulukko 3 *Palvelutasomäärittelyn kriteerit. (Palvelutasomäärittely 2011)*

Vuoroväli (min)	Liikennöintiaika	Palvelutaso	
5 / 15	5:00-4:00	I	KILPAILU +
7,5-10 / 20-30	5:30-23:30 +y	II	KILPAILU
15 / 20-40 ja 20 / 30	5:45-23:15	III	HOUKUTTELEVA +
15-30 / 60 ja 20 / 40	5:45-22:45	IV	HOUKUTTELEVA
60 / 60 ja 20-60 / ei lähtöjä	7:45-16:45	V	AUTOTTOMIEN ARKIYHTEYDET

Vakiolinjoista linja 3 liikennöi myötäpäivään ja 30 vastapäivään. Linjan 13 Kauppatori-Takakirves vuoroista osa liikennöi Impivaaran uimahallille. Linja 14 jatkaa Kaivolisistä matkaansa Erikvallaan ja linja 15 Kaksikertaan. Linjat 21A ja 23A jatkavat Yli-Maariasta matkaansa Paattisille ja linjat 21 ja 23 Tortinmäkeen. Linja 22A jatkaa Jäkärlästä matkaansa Auvaismäkeen ja linja 22B Moision ja Paattisten kautta Tortinmäkeen. Linja 42 liikennöi Pernoon ja linja 32 Pansioon. Linjat 50 ja 51 jatkavat Moikoisista matkaansa Oriniemeen, linja 53 Maanpäähän ja linja 54 Papinsaareen. (Kesäaikataulut; Opaskartta; Toimintakertomus 2012; Turun kaupunki 2013 b)

Yölinjoja ovat linjat 28, 31, 33, 34, 36 ja 82. Yölinjat liikennöivät perjantain ja lauantain sekä lauantain ja sunnuntain välisinä öinä klo 23:45–2:30. Yölinjojen tehtävä on pidentää päivälinjojen liikennöintiaikoja viikonloppuliikenteessä. Yölinjojen lisäksi linjat 1, 6 ja 7 liikennöivät yöllä Kaarinaan, Lentoasemalle, Lietoon, Naantaliin ja Raisioon. (Kesäaikataulut; Opaskartta; Turun kaupunki 2013 b) Kuvassa 3 on esitetty Turun kaupungin sisäiset yölinjat.



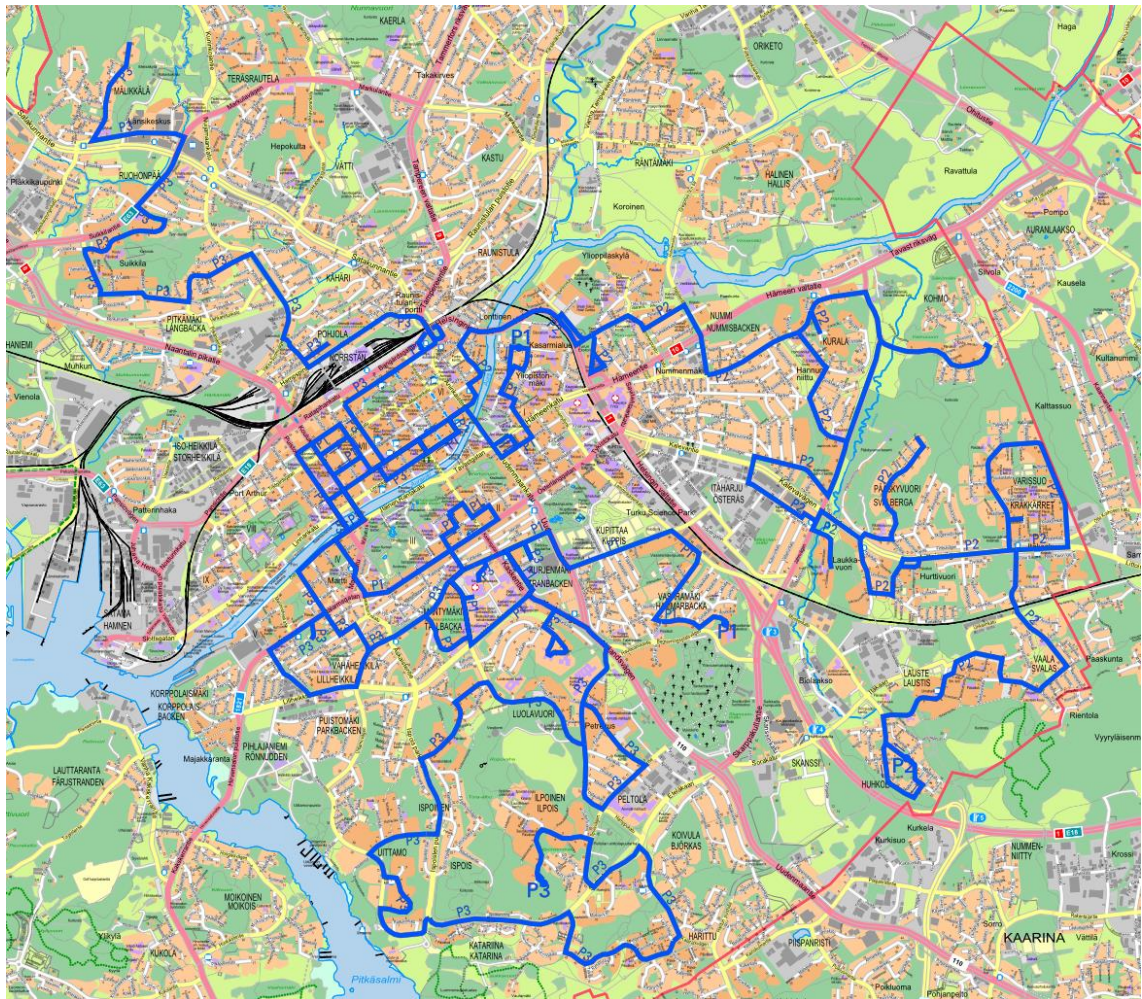
Kuva 3 Turun kaupungin sisäiset yölinjat. (Opaskartta)

Työmatkalinjoja ovat linjat 58, 80, 90, 91, 92 ja 93. Työmatkalinjat ovat aamu- ja iltapäiväruuhkassa ajettavia työmatkaliikennettä palvelevia linjoja. Turussa työmatkalinjat palvelevat lähinnä Pernon telakalle matkustavia työntekijöitä. Neljä työmatkalinjaa liikennöi Varissuolta ja yksi Runosmäestä Pernon telakalle. Poikkeuksena muista työmatkalinjoista on linja 58, joka liikennöi Haarlasta Moikoisten ja Kupittaan aseman kautta Vaapukkiatielle. (Kesäaikataulut; Toimintakertomus 2012; Turun kaupunki 2013 b)

Koululaislinjoja ovat linjat 52, 66, 67, 72, 73, 74, 77, 78 ja 83. Koululaislinjat palvelevat koululaisten matkustustarpeita kotoa koululle sekä koulusta kotiin. Koululaislinjoja on Turun sisäisessä joukkoliikenteessä tarjolla keskustan, Vasaramäen, Ilpoisten, Haarlan, Kaksikerran, Kärsmäen, Pallivahan, Runosmäen, Hannunniitun, Nummenpakan ja Rieskalähteen kouluille sekä Turun Lyseon. Koululaislinjat liikennöivät koulupäivinä 2-4 vuoroa sekä aamulla että iltapäivällä. (Kesäaikataulut; Toimintakertomus 2012; Turun kaupunki 2013 b)

Palvelulinjoja ovat linjat P1, P2 ja P3. Palvelulinjat ovat osa kaikille avointa joukkoliikennettä, mutta linjojen suunnittelussa on huomioitu erityisryhmien, kuten iäkkäiden

ja liikuntarajoitteisten, tarpeet. Palvelulinjalla liikennöivät bussit voivat pysähtyä varsinainen pysäkkialueiden ulkopuolella ja palvelutason maksimoimiseksi kaikissa palvelulinjojen busseissa on matala lattia, ajoliuska, leveät ovet, väljät sisätilat ja automaattivaihteisto. Palvelulinjat tarjoavat joukkoliikennepalveluita erityisesti ostoskeskuksiin, terveysasemille, sairaaloille, kirjastoihin, uimahalleille, hoito- ja vanhainkoteihin sekä palvelutaloille. Linjat liikennöivät maanantaista lauantaihin tunnin välein kahdeksan ja neljän välillä. Lauantaisin aamun ensimmäinen ja kaksi viimeistä iltapäivän vuoroa jätetään ajamatta. (HSL; Opaskartta; Turun kaupunki 2012 d) Kuvassa 4 on esitetty Turun kaupungin sisäiset palvelulinjat.



Kuva 4 Turun kaupungin sisäiset palvelulinjat (Opaskartta)

Tarpeen mukaan liikennöiviä linjoja ovat linjat 100 ja 101. Linja 100 liikennöi Kauppatorilta Messukeskukseen ja HK Areenalle ja linja 101 Kauppatorilta-Logomoon. Linjoille laaditaan aikataulut erikseen aina kutakin yleisötilaisuutta varten. HK Areenalla pelattaviin jääkiekon Liigan otteluihin on kuitenkin laadittu yleisaikataulu, joka on voimassa koko pelikauden. Vuorot Kauppatorilta jääkiekkopeleihin ajetaan 10 minuutin välein alkaen puolitoista tuntia ennen ottelun alkua ja paluukuljetuksia HK Areenalta Kauppatorille ajetaan 45 minuutin ajan ottelun päätyttyä. Logomon linjaa ajetaan silloin kun Logomossa on vähintään 1500 kävijän yleisötapahtuma. (Turun kaupunki 2014 b, c ja d)

2.4 Vakiolinjojen muodostama palvelutaso

Turun kaupungin sisäiset vakiolinjat muodostavat parhaan palvelutason Kohmoon, Länsinummeen, Liljalaaksoon, Naantaliin, Raisioon, Runosmäkeen, Harittuun, Varissuolle, Pansioon ja Pernoon. Kyseisille alueille liikennöivät linjat kuuluvat Turun seudun joukkoliikenteen palvelutasomäärittelyn mukaan palvelutasoluokkaan II. Tällä palvelutasolla joukkoliikenne tarjoaa kilpailukykyisen vaihtoehdon henkilöauton käytölle ja lähes kaikki matkat on mahdollista tehdä joukkoliikenteellä. (Palvelutasomäärittely 2011)

Yksikään vakiolinjoista ei kuitenkaan saavuttanut palvelutasoluokkaa I, jossa vaaditaan arkisin 5 minuutin ja sunnuntaisin 15 minuutin vuoroväli sekä liikennöintiä aika arkisin klo 5:00–04:00 välillä. Tällä palvelutasolla joukkoliikenne tarjoaisi todellisen vaihtoehdon henkilöauton käytölle ja mahdollistaisi kaikkien matkojen tekemisen sujuvasti joukkoliikenteellä. (Palvelutasomäärittely 2011)

Kolmanneksi parhaimpaan palvelutasoluokkaan III sijoittuvat Satamaan, Lentoasemalle, Halisiin, Amiraalistonkadulle, Huolintakadulle, Takakirveeseen, Impivaaran uimahallille, Uittamolle, Moikoisiin ja Ylioppilaskylään liikennöivät linjat. Joukkoliikenne tarjoaa näillä linjoilla houkuttelevan vaihtoehdon henkilöauton käytölle, mutta asiakas joutuu kuitenkin hieman sovittamaan ajankäyttöään erityisesti hiljaisina aikoina joukkoliikenneaika-aulujen mukaisesti. (Palvelutasomäärittely 2011)

Suurin osa Turun kaupungin sisäisistä vakiolinjoista kuuluu palvelutasoluokkaan IV. Kyseisellä palvelutasolla joukkoliikenne tarjoaa harkitsemisenarvoisen ja käyttökelpoisen vaihtoehdon useimmille matkoille. Palvelutasoluokassa IV asiakas joutuu jonkin verran sovittamaan ajankäyttöään joukkoliikenteen aikataulujen mukaisesti. (Palvelutasomäärittely 2011)

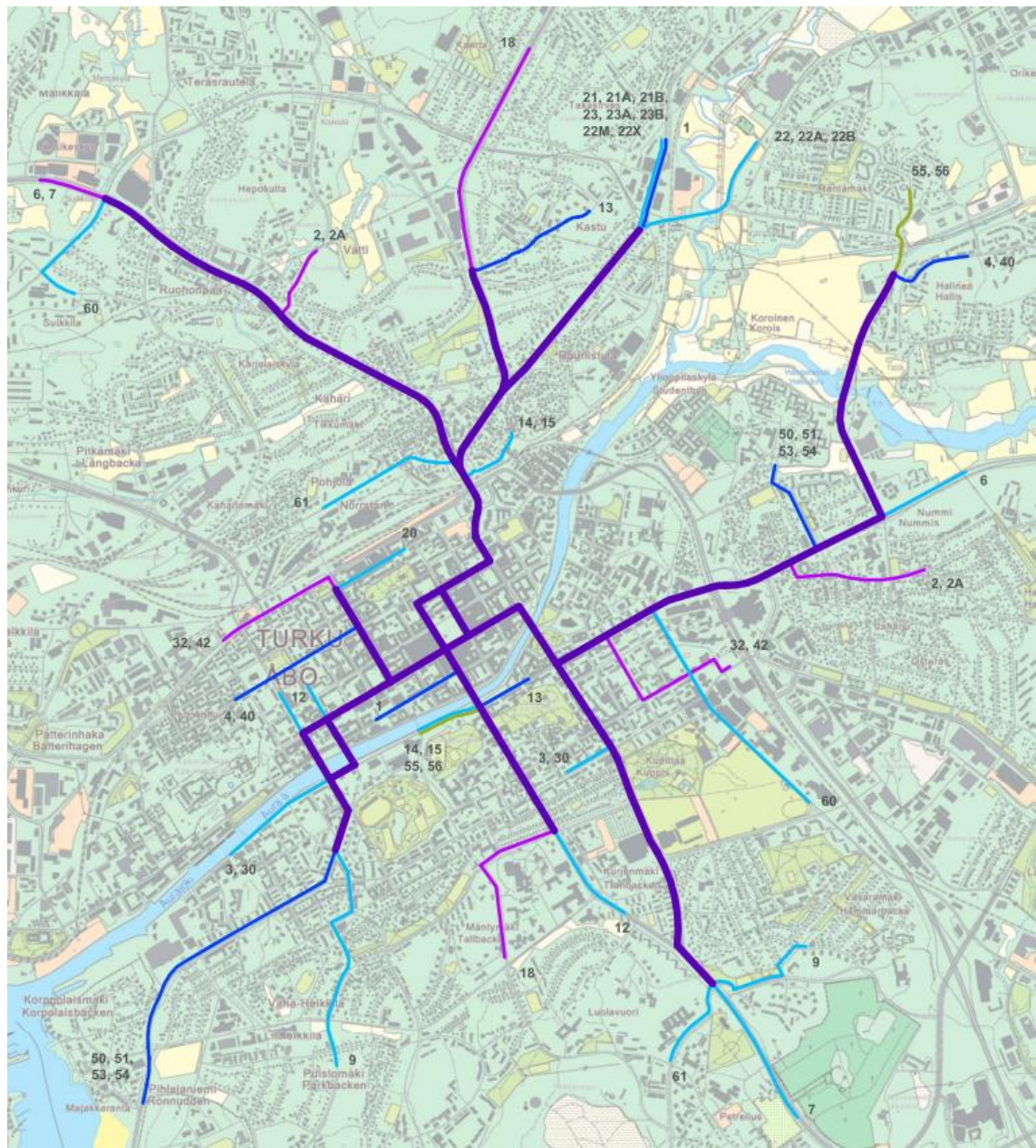
Turun kaupungin sisäiset vakiolinjat muodostavat huonoimman palvelutason Ruissaloon, Röntämäkeen ja Haarlaan. Kyseisille alueille liikennöivät linjat kuuluvat Turun seudun joukkoliikenteen palvelutasomäärittelyn mukaan palvelutasoluokkaan V. Linjojen on tarkoitus tarjota välttämättömät arkiyhteydet autottomille asiakkaille. Palvelutasoluokkaan V sijoittavat myös molemmat Turun kaupungin sisäiset poikittaislinjat. (Palvelutasomäärittely 2011)

Vakiolinjoista yksikään ei kuitenkaan sijoittunut Turun seudun joukkoliikenteen palvelutasomäärittelyn mukaan kahteen huonoimpaan palvelutasoluokkaan VI ja VII. Palvelutasoluokka VI tarjoaa vain välttämättömät työssäkäyntiyhteydet sekä asiointimahdollisuuden kuntakeskukseen 1-2 kertaa viikossa. Palvelutasoluokka VII on joukkoliikenteen minimitaso, jonka tarkoituksena on hoitaa perusopetuslakiin, päivähoitolakiin, sosiaalihuoltolakiin, kehitysvammaislakiin, vammaispalvelulakiin ja kansanterveyslakiin perustuvat lakisääteiset kuljetukset. (Palvelutasomäärittely 2011)

Yksittäisten linjojen muodostaman joukkoliikenteen palvelutason lisäksi Turun kaupungin sisälle muodostuu vahvoja useamman linjan yhdessä muodostamia joukkoliikenteen laatukäytäviä. Joukkoliikenteen laatukäytävät ovat useimmiten palvelutasoluokkiin

II, III ja IV kuuluvien linjojen muodostamia, mutta laatukäytäviä muodostuu Turkuun myös palvelutasoluokan V linjoista. Joukkoliikenteen laatukäytävällä liikennöi aina vähintään kaksi joukkoliikennelinjaa ja laatukäytävän varrella on mahdollista toteuttaa arkisin ruuhka-aikaan vähintään 10 minuutin vuoroväli. (Opaskartta; Turun kaupunki 2013 b)

Kauppatorin ympäristössä tällaisia laatukäytäviä muodostuu Eerikinkadulle, Aura-kadulle, Maariankadulle ja Kauppiaskadulle ja näiden lisäksi keskustan ruutukaava-alueella Humalistonkadulle, Martinkadulle, Aninkaistenkadulle, Hämeenkadulle, Uudenmaankadulle ja Kaskenkadulle. Keskustasta pohjoiseen päin matkustettaessa joukkoliikenteen laatukäytäviä muodostuu Satakunnantielle, Tampereentielle, Tampereen valtatielle ja Raunistulan puistotielle, etelään päin matkustettaessa Uudenmaantielle ja itään päin matkustettaessa Hämeentielle ja Halistentielle. Kuvassa 5 on esitetty tumman lilalla Turun kaupungin sisäisten vakiolinjojen muodostamat joukkoliikenteen laatukäytävät. (Opaskartta; Turun kaupunki 2013 b)



Joukkoliikenteen laatukäytävä

Kuva 5 Turun kaupungin sisäisten vakiolinjojen muodostamat joukkoliikenteen laatukäytävät. (Opaskartta; Paikkatietoikkuna; Turun kaupunki 2013 b)

Kuvaan 5 on joukkoliikenteen laatukäytävien lisäksi merkattu joukkoliikennelinjat, jotka muodostavat näitä laatukäytäviä. Linjat on värikoodattu linjojen palvelutason perusteella. Lilat linjat kuuluvat palvelutasoluokkaan II, tumman siniset linjat palvelutasoluokkaan III, vaalean siniset linjat palvelutasoluokkaan IV ja vaalean vihreä linja palvelutasoluokkaan V. Linjojen reittejä ei ole piirretty kuvassa käänköpaikoille asti. Turun keskustan lisäksi joukkoliikenteen laatukäytäviä muodostuu myös muutamiin Turun kaupungin alakeskuksiin, kuten esimerkiksi Varissuolle linjojen 32, 42 ja 12 yhteistyönä sekä Uittamolalle linjojen 9 ja 13 yhteistyönä. (Opaskartta, Turun kaupunki 2013 c)

3 TURUN SEUDUN JOUKKOLIIKENTEEEN KEHITYS TULEVAISUUDESSA

3.1 Kehitykseen vaikuttava lainsäädäntö

3.1.1. Joukkoliikennelaki

Nykyinen joukkoliikennelaki astui voimaan 3.12.2009. Joukkoliikennelakia sovelletaan joukkoliikenteenä harjoitettavaan ammattimaiseen henkilöiden kuljettamiseen linja-autoilla. Ammattimaisella henkilöiden kuljettamisella tarkoitetaan elinkeinon harjoittamista tai toimeentulon hankkimista henkilöitä kuljettamalla. Joukkoliikennelain tavoitteena on taata ihmisille välttämättömiä liikkumistarpeita vastaavat joukkoliikenteen palvelut koko maassa. Lisäksi tavoitteena on tarjota runsasväkisillä kaupunkiseuduilla ja niiden välisessä liikenteessä joukkoliikennepalveluja, joiden palvelutaso on niin korkea, että se kasvattaa joukkoliikenteen kulkutapaosuutta. (Joukkoliikennelaki 2009)

Joukkoliikennepalvelut tulee ensisijaisesti suunnitella niin, että ne mahdollistavat seudullisen tai alueellisen joukkoliikenneverkon muodostamisen. Tämän mahdollistamiseksi joukkoliikennettä suunnittelevien viranomaisten on aina toimittava yhteistyössä toistensa ja muiden kuntien viranomaisten kanssa. Suunnittelussa joukkoliikennetarpeet ja – palvelut on pyrittävä sovittamaan yhteen ja eri väestöryhmien, kuten lasten, iäkkäiden ja liikuntarajoitteisten tarpeet on otettava huomioon. (Joukkoliikennelaki 2009)

Ammattimainen henkilöiden kuljettaminen linja-autolla korvausta vastaan edellyttää aina liikenneluvan lisäksi joukkoliikennelupaa, reittiliikennelupaa tai kutsujoukkoliikennelupaa. Joukkoliikennelupa oikeuttaa harjoittamaan palvelusopimusasetuksen mukaista liikennettä linja-autolla sekä tilausliikennettä koko maassa Ahvenanmaan maakuntaa lukuun ottamatta. Reittiliikennelupa oikeuttaa harjoittamaan reittiliikennettä linja-autolla ja kutsujoukkoliikennelupa oikeuttaa harjoittamaan kutsujoukkoliikennettä linja-autolla. Edellisistä vain joukkoliikennelupaa sovelletaan palvelusopimusasetuksen mukaisesti harjoitettavaan joukkoliikenteeseen. (Joukkoliikennelaki 2009)

Joukkoliikennelupa voidaan myöntää yritykselle, jolla on pysyvä toimipaikka EU:n jäsenvaltiossa, hyvä maine, asianmukainen vakavaraisuus ja vaadittava ammatillinen pätevyys. Vaadittava ammatillinen pätevyys saavutetaan Suomessa suorittamalla hyväksytysti Liikenteen turvallisuusviraston järjestämä kirjallinen tutkinto. Tutkinnon hyväksytty suoritus edellyttää vaadittuja tietoja aihepiireistä, kuten siviilioikeus, kaupaoikeus, sosiaalioikeus, vero-oikeus, yrityksen kaupallinen ja taloudellinen johtaminen, markkinoille pääsy, tekniset standardit ja toiminnan tekniset näkökohdat sekä liikenneturvallisuus. Lisäksi joukkoliikenneluvan hakijan on täytynyt suorittaa linja-autoliikenteen yrittäjäkurssi, jos hän ei ole toiminut vähintään kahta vuotta henkilölii-

kennettä harjoittavan yrityksen johtotehtävissä. ((EY) N:o 1071/2009; Joukkoliikennelaki 2009)

Joukkoliikennelaissa on edellisten lisäksi asetettu lisävaatimuksia, joiden mukaan joukkoliikennelupa myönnetään hakijalle, joka on täysi-ikäinen, joka ei ole konkurssissa, jolla ei ole erääntyneitä verovelkoja, sosiaaliturvamaksuja eikä ulosotossa olevia velkoja ja jota ei ole määrätty väliaikaiseen tai pysyvään liiketoimintakieltoon. Joukkoliikenneluvan myöntää hakemuksesta Etelä-Pohjanmaan ELY-keskus. Etelä-Pohjanmaan ELY-keskuksen on myös vähintään kerran vuodessa selvitettävä täyttävätkö joukkoliikenneluvan haltijat edelleen joukkoliikenneluvan myöntämisen edellytykset. Joukkoliikennelupa on voimassa viisi vuotta. (Joukkoliikennelaki 2009)

Reittiliikennelupa ja kutsujoukkoliikennelupa myönnetään hakijalle, jolla on joukkoliikennelupa ja joka sitoutuu harjoittamaan liikennettä laatulupauksensa mukaisesti reittiliikenteessä vähintään kahden vuoden ja kutsujoukkoliikenteessä vähintään yhden vuoden ajan. Reittiliikenne- ja kutsujoukkoliikenneluvan myöntää toimivaltainen ELY-keskus, jonka toimivalta-alueella on reittiliikenteen osalta pisin osuus liikennöitävästä reitistä ja kutsujoukkoliikenteen osalta suurin osa järjestettävän joukkoliikenteen toiminta-alueesta. Reittiliikennelupa on voimassa enintään 10 vuotta ja kutsujoukkoliikennelupa enintään viisi vuotta. (Joukkoliikennelaki 2009)

Liikenneluvan haltija on velvollinen harjoittamaan liikennettä luvan mukaisesti ammattitaitoisesti, huolellisesti ja asianmukaisesti. Palvelusopimusasetuksen alaista liikennettä on lisäksi harjoitettava toimivaltaisen viranomaisen ja liikenteen harjoittajan välisen sopimuksen mukaisesti. Liikenneluvan haltija on velvollinen määrittelemään tarjoamiensa liikennepalveluiden laatu ja lisäksi hänen on valvottava liikennepalveluja koskevan laatulupauksensa toteutumista. Liikennepalveluja koskeva laatulupaus on julkaistava liikenneluvan haltijan internetsivuilla ja laatulupauksen tulee myös olla muutoin helposti ja maksutta matkustajien saatavilla. (Joukkoliikennelaki 2009)

3.1.2. Palvelusopimusasetus

Euroopan parlamentti ja Euroopan unionin neuvosto ovat antaneet asetuksen (EY) N:o 1370/2007 rautateiden ja maanteiden julkisista henkilöliikennepalveluista 23 päivänä lokakuuta 2007. Asiaa koskeva lainsäädäntö oli syytä saattaa ajan tasalle, koska 26 päivänä kesäkuuta 1969 annetussa Euroopan unionin neuvoston asetuksessa (ETY) N:o 1191/69 ei säädetä sitä, miten julkisia palveluhankintoja koskevat sopimukset olisi tehtävä, eikä myöskään sitä missä tapauksissa ne olisi kilpailutettava. Julkisia henkilöliikennepalveluita koskeva palvelusopimusasetus on annettu oikeudenmukaisen kilpailun mahdollistamiseksi ja säännellyn kilpailun käyttöönottamiseksi. (PSA 2007)

Palvelusopimusasetus on tullut voimaan 3.12.2009 ja sopimuksen käyttöönotossa on 10 vuoden siirtymäkausi, joka päättyy 3.12.2019. Siirtymäkauden aikana EU:n jäsenvaltioiden on toteutettava toimia palvelusopimusasetuksen käyttöönottamiseksi asteittain. Lisäksi valtioiden on kesäkuuhun 2015 mennessä toimitettava edistymisestään kerto-

mus, josta ilmenee julkisia palveluhankintoja koskevien sopimusten mahdollinen asteittainen täytäntöönpano. (PSA 2007)

Palvelusopimusasetusta sovelletaan tilanteessa, jossa markkinaehtoisien liikenteen järjestäminen ei ole mahdollista luotettavan, korkealaatuisen ja edullisen joukkoliikennepalvelun takaamiseksi. Tällöin julkisesta henkilöliikennepalvelusta maksettavat korvaukset ovat tarpeellisia, jotta julkisen liikenteen harjoittajat pystyvät toimimaan olosuhteissa, jotka mahdollistavat julkisen henkilöliikenteen tuottamisen. Asetuksen tarkoituksena on määrittää toimivaltaisen viranomaisen tukeman julkisen henkilöliikenteen mahdolliset järjestämistavat sekä asettaa ehdot, joiden mukaisesti toimivaltaiset viranomaiset korvaavat julkisen liikenteen harjoittajille aiheutuvat kustannukset. Palvelusopimusasetusta sovelletaan rautateiden ja muiden raideliikennemuotojen sekä maanteiden julkisen henkilöliikenteen kansalliseen ja kansainväliseen harjoittamiseen. (PSA 2007)

Palvelusopimusasetuksessa tarkoitettuja joukkoliikenteen toimivaltaisia viranomaisia ovat toimivaltaiset ELY-keskukset sekä toimivaltaiset kunnalliset viranomaiset. Toimivaltaiset viranomaiset ovat velvollisia määrittämään toimivalta-alueensa joukkoliikenteen palvelutaso. Toimivaltaisilla viranomaisilla on palvelusopimusasetusta soveltaessaan myös velvollisuus toimia tarpeellisilta osin yhteistyössä muiden toimivaltaisten viranomaisten kanssa. Toimivaltaisen kunnallisen viranomaisen järjestämä joukkoliikennepalvelu voi myös vähäisessä määrin ulottua sen varsinaisen toiminta-alueen ulkopuolelle. (Joukkoliikennelaki 2009)

Palvelusopimusasetuksen mukaan yhteisön oikeuden kannalta ei ole merkitystä, sillä tuotetaanko julkiset henkilöliikennepalvelut julkisilla vai yksityisillä yrityksillä. Toimivaltainen paikallinen viranomainen voi päättää tarjota itse julkisia henkilöliikennepalveluja tai tehdä julkisia palveluhankintoja koskevia sopimuksia ilman tarjouskilpailua oikeudellisesti erillisen yksikön kanssa, joka on toimivaltaisen paikallisen viranomaisen määräysvallassa vastaavalla tavalla kuin viranomaisen omat yksiköt. Ilman tarjouskilpailua tehtävien julkisia henkilöliikennepalveluja koskevien sopimusten avoimuutta tulisi kuitenkin lisätä. (PSA 2007)

Tarjouskilpailu ei myöskään ole pakollinen julkisia palveluhankintoja koskevan sopimuksen tekemiselle, jos sopimuksen arvo on pieni tai se koskee lyhyitä matkoja. Palvelusopimusasetuksen mukaan toimivaltainen viranomainen voi tehdä ilman tarjouskilpailua julkisia palveluhankintoja koskevia sopimuksia, joiden vuosittainen arvo on alle 1 000 000 euroa tai jotka tarjoavat julkisia henkilöliikennepalveluita alle 300 000 kilometriä vuodessa. Jos julkisia palveluhankintoja koskeva sopimus on tehty ilman tarjouskilpailua yrityksen kanssa, jolla on käytössään enintään 23 ajoneuvoa, niin sopimuksen arvoa voidaan korottaa 2 000 000 euroon ja julkisten henkilöliikennepalveluiden määrää 600 000 kilometriin vuodessa. Kiireellisissä tapauksissa julkisen henkilöliikennepalvelun turvaaminen on myös mahdollista ilman tarjouskilpailua. (PSA 2007)

Palvelusopimusasetuksen mukaan julkisia palveluhankintoja koskevien sopimusten tulee olla määräaikaaisia, koska pitkäaikaiset julkisen henkilöliikenteen sopimukset joh-

tavat markkinoiden sulkemiseen tarpeettoman pitkäksi ajaksi ja vääristävät kilpailua. Sopimusten voimassaoloaika linja-autoliikenteen palveluissa saa olla enintään 10 vuotta ja rautateiden henkilöliikenteen ja muiden raideliikennemuotojen palveluissa enintään 15 vuotta. Sopimusten voimassaoloaika voidaan kuitenkin pidentää jos sopimus tehdään oikeudenmukaista tarjouskilpailua noudattaen ja julkisen liikenteen harjoittaja tekee poikkeuksellisen suuria investointeja infrastruktuuriin tai liikkuvaan kalustoon tai hänen on investoitava omaisuuteen, jonka investointikustannuksen poistoaika on poikkeuksellisen pitkä tai jos perusteena on poikkeuksellisesta maantieteellisestä sijainnista aiheutuvat kustannukset. (PSA 2007)

Julkisia palveluhankintoja koskevassa sopimuksessa on määriteltävä selkeästi julkisen henkilöliikenteen harjoittajan velvoitteet sekä maantieteelliset alueet, joita sopimus koskee. Sopimuksesta on myös käytävä ilmi julkisten palvelujen tarjoamisesta aiheutuvien kustannusten sekä matkalippujen myynnistä saatavien tulojen jakautuminen toimivaltaisen viranomaisen ja julkisen liikenteen harjoittajan kesken. Toimivaltaiset viranomaiset voivat vapaasti asettaa tarjouskilpailua koskevalle alueelle sosiaalisia ja laadullisia vaatimuksia ylläpitääkseen tai parantaakseen julkisen palvelun laatua. (PSA 2007)

Toimivaltaisen viranomaisen suunnitellessa julkisia palveluhankintoja koskevan sopimuksen tekemistä, on hänen tiedotettava asiasta vähintään vuosi etukäteen. Tällöin julkisen liikenteen harjoittajilla on aikaa reagoida mahdolliseen tarjouskilpailuun. Palvelusopimusasetuksen pohjalta tehdyn sopimuksen perusteella toimivaltainen viranomainen on velvollinen maksamaan julkisen henkilöliikenteen harjoittajalle korvausta tuotetusta palvelusta. Korvauksen tarkoituksena on yleishyödyllisten palveluiden varmistaminen eikä korvaus saa ylittää julkisen palvelun velvoitteiden täyttämisestä aiheutuneita nettokustannuksia, ottaen huomioon liikenteen harjoittamisesta saadut tulot. (PSA 2007)

3.1.3. Suomen ilmastopolitiikkaa ohjaavat kansainväliset sopimukset

Tärkeimmät Suomen ilmastopolitiikkaa ohjaavat kansainväliset sopimukset ovat YK:n ilmastonmuutosta koskeva puitesopimus (UNFCCC eli ns. ilmastosopimus) sekä sen alainen Kioton pöytäkirja. Ilmastosopimus hyväksyttiin Rio de Janeiron huippukokouksessa vuonna 1992 ja se astui voimaan vuonna 1994. Ilmastosopimuksen tarkoituksena on kasvihuonekaasupitoisuuksien vakauttaminen ilmakehässä tasolle, jolla pidetään ilmastonmuutoksen haitalliset vaikutukset siedettävänä ympäristön ja ihmiskunnan terveydelle sekä hyvinvoinnille. (LVM 2009)

Kioton pöytäkirja hyväksyttiin Kiotossa vuonna 1997 ja se astui voimaan vuonna 2005. Kioton pöytäkirja sisältää kehittyneitä maita koskevia päästövähennys- ja rajoitusvelvoitteita ja pöytäkirjassa esitetyt velvoitteet ovat oikeudellisesti sitovia toisin kuin 1992 hyväksytyssä ilmastosopimuksessa. Yksityiskohtaiset säännöt Kioton pöytäkirjan täytäntöönpanosta hyväksyttiin COP 7 konferenssissa Marrakechissa vuonna 2001 ja pöytäkirjan ensimmäinen velvoitekausi oli voimassa vuodesta 2008 vuoteen 2012. En-

ensimmäisellä velvoitekaudella 37 teollisuusmaata sekä Euroopan unioni (EU) sitoutuivat vähentämään kasvihuonekaasupäästöjä keskimäärin viidellä prosentilla verrattuna vuoden 1990 tasoon. Ensimmäisellä velvoitekaudella EU:n tavoitteena oli vähentää kasvihuonekaasupäästöjä kahdeksan prosenttia. (LVM 2009; UNFCCC 2014 a; United Nations 2012)

Kioton pöytäkirjan ensimmäisen velvoitekauden päättyessä Dohassa järjestettiin 26.11.–8.12.2012 YK:n ilmastomuutosta koskeva COP 18 konferenssi, jonka tarkoituksena oli päästä sopimukseen vuoden 2012 jälkeistä ilmastopolitiikkaa ohjaavasta sopimusjärjestelmästä. Kioton pöytäkirjan toinen velvoitekausi hyväksyttiin Dohassa 8.12.2012 ja se on voimassa vuodesta 2013 vuoteen 2020. Toisella kahdeksan vuotta kestäväällä velvoitekaudella 37 valtiota sekä EU sitoutuvat vähentämään kasvihuonekaasupäästöjä vähintään 18 prosenttia vuoden 1990 tasoon verrattuna. EU on sitoutunut vähentämään kasvihuonekaasupäästöjä 20 prosenttia vuoteen 2020 mennessä, mutta on valmis vähentämään päästöjä 30 prosenttia, edellyttäen, että muut kehittyneet maat sitoutuvat vastaaviin päästövähennystavoitteisiin ja kehitysmaat edistyvät riittävästi huomioon ottaen heidän vastuunsa ja valmiutensa. (LVM 2009; UNFCCC 2014 a ja b; United Nations 2012)

Vuonna 2013 alkaneella velvoitekaudella Kioton pöytäkirjan sopimusosapuolten koostumus on kuitenkin erilainen kuin ensimmäisellä velvoitekaudella. Kioton pöytäkirjan toisesta velvoitekaudesta pois jäivät ensimmäisellä velvoitekaudella mukana olleet Kanada, Japani, Uusi-Seelanti ja Venäjä sekä uusina mukaan tulivat Valko-Venäjä, Kypros, Kazakstan ja Malta. Suomi on ollut mukana Kioton pöytäkirjan ensimmäisessä velvoitekaudessa ja sitoutunut myös tällä hetkellä voimassa olevaan pöytäkirjan toiseen velvoitekauteen. Kiina ja Yhdysvallat eivät ole sitoutuneet Kioton pöytäkirjan velvoitteisiin. (United Nations 2012)

Kioton pöytäkirjan päästövähennysvelvoitteisiin perustuen sekä EU että Suomi ovat asettaneet itselleen päästövähennystavoitteita sekä pohtineet keinoja näiden päästövähennystavoitteiden saavuttamiseksi. EU on asettanut itselleen kolme ilmasto- ja energiapolitiikkaa koskevaa tavoitetta vuodelle 2020. Nämä kolme tavoitetta ovat niin sanottu 20–20–20-tavoitteet eli kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen 20 prosentilla, uusiutuvan energian osuuden nostaminen 20 prosenttiin ja energiatehokkuuden parantaminen 20 prosentilla vuoteen 2020 mennessä. (COM(2014) 15 final)

Vuoteen 2012 mennessä EU:n tuottamat kasvihuonekaasupäästöt olivat 18 % pienemmät kuin vuonna 1990 ja nykyisillä toimenpiteillä niiden odotetaan vähenevän vuoteen 2030 mennessä 32 prosenttia vuoden 1990 tasosta. Uusiutuvan energian osuus energian kokonaiskulutuksesta oli vuonna 2012 13 prosenttia ja sen odotetaan nousevan 24 prosenttiin vuoteen 2030 mennessä. Energiatehokkuutta koskeva vuoteen 2020 asetettu tavoite ei ole sitova ja tällä hetkellä näyttää siltä, että asetettua 20 prosentin tavoitetta ei saavuteta. (COM(2014) 15 final)

Euroopan komission uusimmassa ilmasto- ja energiapolitiikkaa koskevassa tiedonannossa komissio ehdottaa kasvihuonekaasupäästöjen vähennystavoitteeksi 40 % vuoteen 2030 mennessä vuoden 1990 tasoon verrattuna. Tämä tavoite on saavutettavissa, mutta edellyttää lisäponnisteluja nykyisten toimenpiteiden rinnalla. Kasvihuonekaasupäästöjen vähennystavoitteet jakautuisivat niin, että EU:n päästökauppajärjestelmään kuuluvilla aloilla olisi saatava aikaa 43 prosentin ja päästökauppaan kuulumattomilla aloilla 30 prosentin vähennys vuoden 2005 tasosta. Uusiutuvan energian osuuden energian kokonaiskulutuksesta tulisi uusimpien tavoite-ehdotusten mukaan nousta 27 prosenttiin vuoteen 2030 mennessä. Euroopan komissio ei ehdota tiedonannossaan uutta energiatehokkuutta koskevaa tavoitetta vuoteen 2030, mutta toteaa, että energiatehokkuuteen liittyvien tavoitteiden uudelleentarkastelu on välttämätöntä. (COM(2014) 15 final)

Päästövähennys- ja energiatehokkuustavoitteiden taustalla on EU:n tavoite rajoittaa maailman keskilämpötilan nousu enintään kahteen asteeseen esiteolliseen aikaan verrattuna (VNK 2009). Maailman keskilämpötilan nousun pysäyttämiseksi EU:n on vähennettävä kasvihuonekaasupäästöjä 80–95 prosenttia vuoteen 2050 mennessä vuoden 1990 tasosta. Liikenteelle on kuitenkin asetettu muista aloista poiketen 60 prosentin päästövähennystavoite vuoteen 2050 mennessä vuoden 1990 tasoon verrattuna. Liikennesektorin tavoitteena on vähentää kasvihuonekaasupäästöjä 20 prosenttia vuoteen 2030 mennessä vuoden 2008 tasosta. (KOM(2011) 144 lopullinen)

Suomessa liikenne- ja viestintäministeriön hallinnonala on sitoutunut EU:n yhteisiin kasvihuonekaasupäästöjen vähentämistavoitteisiin sekä yhteiseen tavoitteeseen saada maailman keskilämpötilan nousu rajoitettua enintään kahteen asteeseen. Valtioneuvosto on asettanut Suomen tavoitteeksi kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisen 80 prosentilla vuoteen 2050 mennessä vuoden 1990 tasosta. Suomen ilmastopoliittisessa selonteossa on asetettu EU:n tavoitteista poiketen myös kotimaan liikenteelle 80 prosentin päästövähennystavoite vuoteen 2050 mennessä vuoden 1990 tasosta. (LVM 2009; VNK 2009)

Tavoitteet saavuttaakseen Suomen tulee vähentää kasvihuonekaasupäästöjä ei-päästökauppasektorilla (maatalous, rakentaminen, asuminen ja liikenne) 16 prosenttia vuoteen 2020 mennessä verrattuna vuoden 2005 tasoon. Pitkän aikavälin ilmasto- ja energiastrategia asetti kuitenkin muista ei-päästökauppasektoreista poiketen kotimaan liikenteelle 15 prosentin päästövähennysvelvoitteen vuoteen 2020 mennessä. Liikenteen päästövähennystoimenpiteet kohdistetaan erityisesti tieliikenteeseen, jossa päästövähennyspotentiaali on suurin. Liikenteen energiankulutuksen osalta tavoitteena on energiankulutuksen kasvun pysäyttäminen ja kääntäminen laskuun ennen vuotta 2020. (LVM 2013)

Liikenteen ympäristöstrategiassa 2013–2020 on asetettu Suomen tavoitteeksi, että henkilöautoliikenne on lähes täysin päästötöntä vuonna 2050. Jotta tavoite toteutuisi, tulisi kaikkien vuonna 2030 myytävien uusien henkilöautojen olla vaihtoehtoisten polttoaineiden tai käyttövoimien käyttöön soveltuvia. Tämän mahdollistamiseksi tavoitte-

na on, että vuonna 2020 myytävistä uusista henkilöautoista 50 prosenttia on vaihtoehtoisten polttoaineiden käyttöön soveltuvia. Lisäksi nestemäisten ja kaasumaisten biopolttoaineiden osuuden on oltava vähintään 70 prosenttia raskaan liikenteen käyttämistä polttoaineista vuonna 2050. Sähkön osuus kaupunkien bussi- ja jakeluliikenteessä tulee olla samaa luokkaa. (LVM 2013) Taulukossa 4 on esitetty kansalliset ja kansainväliset päästövähennystavoitteet sekä nykyinen ja tavoiteltava uusiutuvan energian osuus energian kokonaiskulutuksesta.

Taulukko 4 Kansalliset ja kansainväliset päästövähennystavoitteet sekä nykyinen ja tavoiteltava uusiutuvan energian osuus energian kokonaiskulutuksesta. (COM(2014) 15 final; KOM(2011) 144 lopullinen; LVM 2013; LVM 2009; UNFCCC 2014 a; United Nations 2012; VNK 2009)

Vuosi	Päästövähennystavoitteet (vv. 1990)				
	Kioto pöytäkirjan sopimusosapuolet	EU		Suomi	
	YHT.	YHT.	liikenne	YHT.	liikenne
2020	18 %	20 %	ets.	ets.	15 % (vv. 2005)
2030	ets.	40 %	20 % (vv. 2008)	ets.	ets.
2050	ets.	80-95 %	60 %	80 %	80 %

Vuosi	Uusiutuvan energian osuus energian kokonaiskulutuksesta
2012	13 %
2020	20 %
2030	27 %

ets. = ei tietoa saatavilla

EU ja Yhdysvallat ovat tuottaneet yli puolet maailman kasvihuonekaasupäästöistä ja ihmiskunnan tuottamista päästöistä lähes 80 % on peräisin nykyisistä teollisuusmaista. Tämän takia myös päävastuu kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisestä on EU:lla ja muilla teollisuusmailla. Kasvihuonekaasupäästöjen merkittävin lähde on fossiilisten polttoaineiden käyttäminen energiantuotannossa ja liikenteessä. Liikenne käyttää edelleen energianlähteenään 96 prosenttisesti fossiilisia polttoaineita aiheuttaen 13,5 % kai- kista maailman kasvihuonekaasupäästöistä. (KOM(2011) 144 lopullinen; VNK 2009) Jotta liikenteelle asetetut päästövähennystavoitteet voidaan saavuttaa, tarvitsee liiken-

nesektorilla käyttöönottaa tulevaisuudessa vaihtoehtoisia uusiutuvia polttoaineita. Liikennesektorin kehityksen painopisteen tulisi olla liikennejärjestelmän tehokkuuden parantamisessa, sähköisten ajoneuvojen kehittämisessä ja käyttöönotossa sekä vaihtoehtoisissa kestävässä polttoaineissa. (COM(2014) 15 final)

3.2 Joukkoliikennejärjestelmän kehitys

3.2.1. Turun kaupungin tavoitteet ja päätökset

Turun seudulla tavoitellaan palveluiltaan sekoittuneen, lyhyiden etäisyyksien jalankulkaupungin sekä kunta- ja alakeskuksiin ulottuvan joukkoliikennekaupungin kehittämistä. Turun keskustassa ja sen sisääntuloväylillä katuverkon kapasiteettia ei ole enää mahdollista merkittävästi lisätä, joten liikenteen toimivuus ja keskustan saavutettavuus kaikilla kulkutavoilla on turvattava jalankulun, pyöräilyn ja joukkoliikenteen suosiota kasvattamalla. Tämä on mahdollista jalankulun ja pyöräilyn edellytyksiä parantamalla sekä Turun joukkoliikennejärjestelmää kehittämällä. (RM35 2012)

Vuonna 2009 Kaarina, Lieto, Naantali, Raisio ja Turku tilasivat yhdessä Varsinais-Suomen Liiton ja liikenne- ja viestintäministeriön kanssa WSP Finland Oy:ltä selvitystyön koskien Turun seudun joukkoliikennejärjestelmän kehittämistä. Turun seudun joukkoliikenne 2020 – selvityksessä tutkittiin kolmea vertailuvaihtoehtoa tulevaisuuden joukkoliikennejärjestelmäksi Turun seudulla vuoteen 2020 mennessä. Vertailuvaihtoehtoina olivat nykyisen kaltainen bussiliikennejärjestelmä, runkobussijärjestelmä sekä raitiotiejärjestelmä. (Turun seudun joukkoliikenne 2020)

Työssä todettiin, että Turun seudulle on mahdollista luoda sekä toimiva runkobussijärjestelmä että raitiotiejärjestelmä, mutta raitiotiejärjestelmävaihtoehdon hyötykustannus – suhde ei kuitenkaan tulosten mukaan ylittänyt kannattavuusrajaa. Selvitystyön tulosten perusteella ehdotettiin runkobussilinjaston kehittämistä sekä runkobussilinjastoa tukevan joukkoliikenneväylästä toteuttamista. Tämän lisäksi ehdotettiin käytettävän liikenne-ennustemallin tarkentamista sekä raitiotiehen perustuvan maankäyttövision laatimista. (Turun seudun joukkoliikenne 2020)

Turun kaupunginvaltuusto päätti 14.12.2009 hyväksyä Turun seudun joukkoliikenne 2020 – selvityksen siten, että tulevaisuuden joukkoliikennejärjestelmäksi valitaan runkobussijärjestelmä. Runkobussijärjestelmä toteutetaan vaiheittain niin, että ensimmäisessä vaiheessa toteutetaan runkobussilinjoiden edellyttämät pysäkki-, joukkoliikennekatu- ja etuusjärjestelyt ja tämän jälkeen runkobussilinoja toteutetaan yksi kerrallaan aloittaen jo valmiiksi voimakkaista linjoista. Lisäksi päätettiin, että raskaimmin kuormitetuille linjoille toteutetaan raitiotie, kun sille on rahoitukselliset ja kaavalliset edellytykset. (Selvitys etenemisestä 2010; Täytäntöönpano 2010)

Turku on sitoutunut kestävä kehityksen edistämiseen. Ilmastonmuutoksen hillinnän osalta Turku on sitoutunut kehittämään ja noudattamaan strategista ja yhtenäistä lähestymistapaa ilmastonmuutoksen lieventämiseksi, saattamaan kasvihuonekaasupäästöt

kestävälle tasolle, lisäämään tietoisuutta ilmatonmuutoksen syistä ja todennäköisistä seurauksista sekä integroimaan ehkäisevät toimenpiteet osaksi ilmastomuutosta koskevaa toimintapolitiikkaa. Turun kaupungin ilmasto- ja ympäristöohjelman 2009–2013 ohjaavia periaatteita ovat muun muassa kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen, uusiutuvan energian ja kestävien liikkumismuotojen käytön lisääminen sekä joukkoliikenteen kehittäminen. (Turun kaupunki 2014 e)

Ilmasto- ja ympäristöohjelman ohjaavien periaatteiden pohjalta Turun kaupunki on asettanut itselleen kestävää kehitystä edistävät tavoitteet. Tavoitteiden mukaan Turun kaupunki vähentää kasvihuonekaasupäästöjään vähintään 20 % vuoden 1990 tasosta vuoteen 2020 mennessä, 100 prosenttia kaupungin ostamasta sähköstä tuotetaan uusiutuvalla energialla vuoteen 2013 mennessä, kävelyn, pyöräilyn ja joukkoliikenteen osuus Turussa on yli 55 % vuoteen 2013 ja yli 66 % vuoteen 2030 mennessä, joukkoliikenteen matkamäärä kasvaa noin 2 % vuodessa, joukkoliikenne nopeutuu suhteessa henkilöautoliikenteeseen ja joukkoliikenteen runkobussilinjasto on toteutettu kokonaisuudessaan vuoteen 2020 mennessä. (Turun kaupunki 2014 e)

Turun kaupungin tavoite kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisestä tukee täysin EU:n 20 prosentin päästövähennystavoitetta vuoteen 2020 mennessä. Ilmasto- ja ympäristöohjelman seurannan vuosiraportin 2012 mukaan 100 % Turun kaupungin ostamasta sähköstä tuotettiin uusiutuvalla energialla vuonna 2013. Kävelyn, pyöräilyn ja joukkoliikenteen osuuden kasvu yli 66 prosenttiin vuoteen 2030 mennessä tarkoittaa 20 % kasvua kävelyn, pyöräilyn ja joukkoliikenteen osuudessa vuoteen 2008 verrattuna. Joukkoliikenteen matkamäärän kasvu vuonna 2012 oli noin 3 %, mutta vuonna 2013 joukkoliikenteen matkamäärä ei kasvanut. Turun seudulla tehtiin vuonna 2013 noin 21 miljoonaa joukkoliikennematkaa. (Kävelyn ja pyöräilyn kehittämisohjelma 2010; Toimintakertomus 2013; Turun kaupunki 2014 e)

Turun kaupunginhallitus päätti 8.10.2013, että Turun seudun joukkoliikenteessä tul- laan jatkossa priorisoimaan sähkö- ja hybridikalustoa. Turussa on jo usean vuoden ajan ollut käytössä neljä osittain akkutekniikalla toimivaa hybridibussia, joiden polttoaineku- lut ovat 25 % tavallista dieselbussia pienemmät. Hybridibussit kulkevat pääasiassa lin- joilla 3 ja 30 sekä osittain linjoilla 4 ja 40. Sähkö nähdään hyvänä bussien voimanläh- teenä myös tulevaisuudessa sekä ympäristön että matkustusmukavuuden kannalta. Säh- köbussien yleistymisen loisi hyvää synergiaa Turkuun suunniteltavalle raitiotieratkai- sulle sekä tukisi sähköautojen yleistymistä. (Turun kaupunki 2013 c)

3.2.2. Runkobussilinjasto

Runkobussilinjastolla tarkoitetaan sujuvuudeltaan, nopeudeltaan, vuoroväliltään ja laa- dultaan korkeatasoista joukkoliikennelinjastoa. Turun seudulla runkobussilinjoilla tavoit- tellaan ensisijaisesti raitiotiemäistä liikennöintiä. Runkobussilinjaston toteuttamiseksi Kaarinan, Liedon, Naantalın, Raision ja Turun kunnat sekä Varsinais-Suomen liitto ja ELY-keskus laativat vuonna 2012 yhteistyönä Turun seudun runkobussilinjaston kehit- tämisohjelmaluonnoksen. (Luonnos 2012; Turun seudun joukkoliikenne 2020)

Runkobussilinjaston kehittämisohjelmaluonnoksen mukaan runkobussilinjojen sujuvuuden ja nopeuden kannalta on välttämätöntä, että runkolinjastolla toteutetaan joukkoliikenne-etuuksia, kuten joukkoliikennekaistoja ja – katuja sekä liikennevaloetuksia. Runkobussilinjoilla ei myöskään tule olla hidasteita, jotka haittaavat joukkoliikenteen sujuvuutta. Runkobussilinjan reitin tulee olla mahdollisimman suora, koukkauksia pääreitiltä tulee välttää ja vaihtaminen joukkoliikennevälineestä toiseen tulee olla helppoa. (Luonnos 2012; Selvitys etenemisestä 2010)

Runkobussilinjoilla kalusto ja pysäkit ovat korkeatasoisia ja yhtenäisiä. Kalusto on matalalattiaista, modernia ja ympäristöystävällistä. Pysäkit ovat helposti tunnistettavissa ja löydettävissä sekä esteettömästi saavutettavissa sekä kävellen että pyörällä. Pyörille tulee tarpeen mukaan olla liityntäpysäköintimahdollisuus pysäkkien yhteydessä. Vuoroväli runkobussilinjoilla saa olla arkisin päiväsaikaan korkeintaan 10 minuuttia ja pyhänä korkeintaan 20 minuuttia. Linjojen tulee liikennöidä aamuvarhaisesta iltamyöhään. Asiakkaan tulee saada ajantasaista informaatiota runkobussien saapumisesta pysäkeille sekä niiden mahdollisista häiriöistä. (Luonnos 2012; Turun seudun joukkoliikenne 2020)

Kokemukset aikaisemmin toteutetuista runkobussilinjoista sekä maailmalla että Suomessa ovat olleet positiivisia. Ulkomaisissa runkobussijärjestelmien toteutuksissa ovat korostuneet riittävät taloudelliset resurssit sekä rohkeat päätökset asettaa joukkoliikenne henkilöautoliikenteen edelle. Runkobussilinjaston kehittämisohjelmaluonnoksessa on esitetty Turun seudulle suunniteltu runkobussilinjasto ja sitä täydentävä linjasto sekä runkobussilinjaston edellyttämät infratoimenpiteet. Runkobussilinjaston suunnittelualueeseen kuuluvat Kaarina, Lieto, Naantali, Raisio ja Turku. Runkobussilinjasto-suunnitelman toteutuksen myötä vahvistuvat runkobussilinjojen reitit mahdollistavat voimakkaimpien reittien muuttamisen tulevaisuudessa raideyhteyksiksi. (Luonnos 2012)

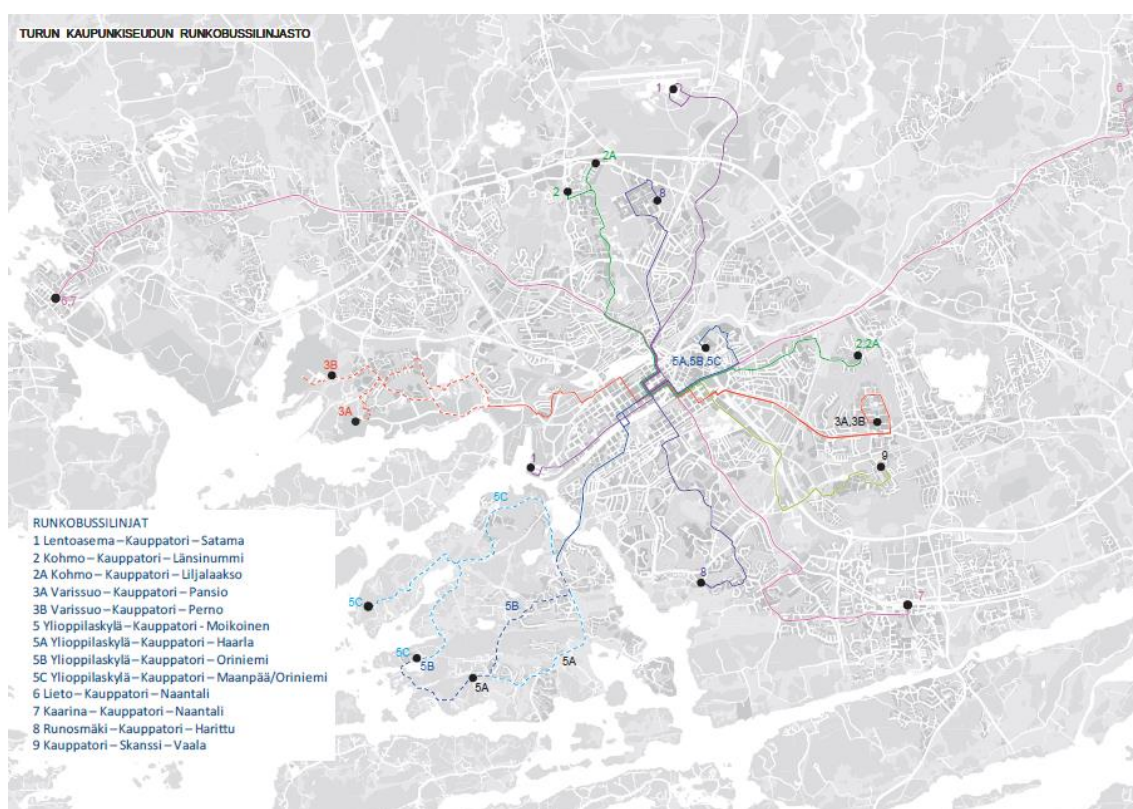
Turun seudun runkobussilinjasto on suunniteltu palvelemaan mahdollisimman hyvin asutus-, työpaikka- ja palvelukeskittymiä ja se kattaa Kaarinan, Liedon, Naantalín, Raision ja Turun kuntakeskukset. Suurista palvelukeskittymistä esimerkiksi Kauppatori, Länsikeskus, Skanssi, Itäharju, Kupittaa ja Piispanristi sijoittuvat runkobussilinjojen varteen. Lisäksi on varauduttu runkobussilinjan 2 jatkamiseen Nättinumesta Myllylle. Matkaketjujen sujuvuus kaukoliikenteen verkkoon varmistetaan suunnittelemalla runkobussilinjat kulkemaan linja-auto- ja rautatieaseman kautta. (Luonnos 2012)

Viimeisimmässä Turun joukkoliikennetoimiston suunnitelmassa on esitetty toteutettavaksi 13 runkobussilinjaa. Suunniteltuja runkobussilinjoja ovat nykyiset linjat 1, 2, 2A, 6,7, 9, 18, 32, 42, 50, 51, 53 ja 54. Näistä runkobussilinjan ominaisuudet täyttäviä linjoja ovat tällä hetkellä linjat 2, 2A, 18, 32 ja 42. Loput linjoista on tarkoitus muuttaa runkobussilinjoiksi vuoteen 2020 mennessä. (Joukkoliikennetoimisto 2014; Kesäaika- taulut; Turun kaupunki 2014 e; Turun kaupunki 2013 b)

Nykyään linjat 1 Satama-Kauppatori sekä linjat 6 ja 7 Naantali-Raisio-Kauppatori palvelevat arkisin ruuhka-aikaan 10 minuutin ja pyhänä 30 minuutin vuorovälillä. Linja

1 Lentoasema-Kauppatori palvelee arkisin ruuhka-aikaan 20 minuutin ja pyhänä 30 minuutin vuorovälillä. Linja 9 Vaala-Skanssi-Kauppatori sekä linjat 6 ja 7 Kauppatori-Kaarina/Lieto palvelevat arkisin ruuhka-aikaan 20 minuutin ja pyhänä 60 minuutin vuorovälillä sekä linjat 50, 51, 53 ja 54 arkisin ruuhka-aikaan 15 minuutin ja pyhänä 30 minuutin vuorovälillä. (Kesäaikataulut; Turun kaupunki 2013 b)

Runkobussilinjaston toteutumisen myötä joidenkin linjojen linjanumerot tulevat muuttumaan. Nykyinen linja 18 Runosmäki-Kauppatori-Harittu vastaa suunniteltua runkobussilinjaa 8, nykyiset linjat 32 ja 42 Varissuo-Kupittaaan asema-Kauppatori-Pansio/Perno vastaavat suunniteltuja runkobussilinjoja 3A ja 3B ja nykyiset linjat 50, 51, 53 ja 54 Moikoinen-Kauppatori-Ylioppilaskylä vastaavat suunniteltuja runkobussilinjoja 5, 5A, 5B ja 5C. (Joukkoliikennetoimisto 2014) Kuvassa 6 on esitetty suunnitelma Turun seudun runkobussilinjastosta.



Kuva 6 Turun seudun runkobussilinjasto. (Joukkoliikennetoimisto 2014)

Nykyinen linja 1 Lentoasema-Kauppatori-Satama pysyy runkobussilinjastosuunnitelmassa reitin osalta nykyisellään, mutta vuoroväli Lentoasema-Kauppatori välillä paranee arkisin 20 minuutista 10 minuuttiin ja koko linjalla pyhänä 30 minuutista 20 minuuttiin. Turun matkakeskuksen valmistuttua runkobussilinjan 1 reitti siirretään kulkemaan matkakeskuksen kautta (Luonnos 2012). Suunnitelmien mukaan matkakeskus tulisi sijaitsemaan Turun keskusta-alueen pohjoisreunalla nykyisen linja-autoaseman alueella. Matkakeskus on kaavoitettu Turun ratapihan, Brahenkadun, Läntisen pitkänkadun ja Aninkaisten sillan väliselle alueelle. (Ratapiha-alueen osayleiskaava)

Nykyisten linjojen 2 ja 2A reitti sekä vuoroväli pysyvät runkobussilinjastosuunnitelmassa nykyisellään. Suunnitelmassa on kuitenkin varauduttu siihen, että linjan reittiä voidaan tarvittaessa jatkaa Nättinumesta Myllylle ja Kohmosta Auranlaaksoon (Luonnos 2012). Runkobussilinjosten 3A ja 3B reitti noudattaa nykyisten linjojen 32 ja 42 reittejä ja linjojen vuorotarjontaa säilyy ennallaan.

Runkobussilinjat 5, 5A, 5B ja 5C toteutetaan reitiltään nykyisten linjojen 50, 51, 53 ja 54 kaltaisina. Linjojen vuoroväli paranee arkisin ruuhka-aikaan 15 minuutista 10 minuuttiin ja pyhäpäivinä 30 minuutista 20 minuuttiin. Nykyisten linjojen 6 ja 7 Naantali-Raisio-Kauppatori-Kaarina/Lieto muuttaminen runkobussilinjaksi parantaa Naantali-Raisio-Kauppatori – akselilla vuoroväliä pyhänä 30 minuutista 20 minuuttiin ja Kauppatori-Kaarina/Lieto – akselilla vuoroväliä arkisin 20 minuutista 10 minuuttiin ja pyhänä 60 minuutista 20 minuuttiin. Runkobussilinja 8 toteutuu reitiltään ja vuoroväliltään nykyisen linjan 18 kaltaisena. Runkobussilinjaston kehittämisohjelmaluonnoksen mukaan linjan sujuvuutta kuitenkin parannettaisiin toteuttamalla lyhyt joukkoliikennekatu Nostoväenkadulta Varusmestarintielle (Luonnos 2012).

Nykyisen linjan 9 Vaala-Skanssi-Kauppatori-Katariina reittiä on runkobussilinjastosuunnitelmassa muokattu hieman Vaala-Skanssi-Kauppatori – akselilla, eikä runkobussilinja 9 jatka matkaansa Kauppatorilta Katariinaan nykyisen linjan mukaisesti. Runkobussilinjasta 9 Vaala-Skanssi-Kauppatori vuoroväli paranee arkisin ruuhka-aikaan 20 minuutista 10 minuuttiin ja pyhänä 60 minuutista 20 minuuttiin.

Runkobussilinjastosuunnitelman toteutumisen ansiosta tapahtuvat joukkoliikenteen palvelutasoparannukset ovat merkittävimpiä Kaarinan, Liedon ja Skanssin suunnissa, jossa vuoroväli paranee arkisin ruuhka-aikaan 20 minuutista 10 minuuttiin ja pyhänä 60 minuutista 20 minuuttiin. Merkittäviä palvelutasoparannuksia toteutetaan myös linjoilla 1 Lentoasema-Kauppatori ja 50, 51, 53 ja 54 Ylioppilaskylä-Kauppatori. Kyseisillä linjoilla vuoroväli paranee arkisin ruuhka-aikaan 15–20 minuutista 10 minuuttiin ja pyhänä 30 minuutista 20 minuuttiin. Taulukossa 5 on esitetty punaisella runkobussilinjaston toteutumisen ansiosta tapahtuvat nykyisten joukkoliikennelinjojen palvelutasoparannukset.

Taulukko 5 Runkobussilinjaston toteutumisen ansiosta tapahtuvat nykyisten joukkoliikennelinjojen palvelutasoparannukset. (Joukkoliikennetoimisto 2014; Opaskartta; Paikkatietoikkuna; Turun kaupunki 2013 b)

Nykyinen linja	Uusi linja	Liikennöintiväli	Linjapituus	Vuoroväli ruuhka/pyhä
1	1	Lentoasema-Kauppatori	9	10 / 20
		Kauppatori-Satama	3,5	10 / 20
2, 2A	2, 2A	Kohmo-Kauppatori	6	10 / 20
		Kauppatori-Länsinummi/Liljalaakso	6,5	10 / 20

32, 42	3A, 3B	Varissuo-Kupittaaan asema-Kauppatori	8,5	10 / 20
		Kauppatori-Pansio/Perno	9,5-10	10 / 20
50, 51, 53, 54	5, 5A, 5B, 5C	Moikoinen-Kauppatori	6,5	10 / 20
		Kauppatori-Ylioppilaskylä	4	10 / 20
6, 7	6, 7	Naantali-Raisio- Kauppatori	17	10 / 20
6	6	Lieto-Kauppatori	14	10 / 20
7	7	Kaarina-Kauppatori	13,5	10 / 20
18	8	Runsmäki-Kauppatori	6,5	7,5 / 20
		Kauppatori-Harittu	7	7,5 / 20
9	9	Vaala-Skanssi- Kauppatori	8,5	10 / 20

Runkobussilinjaston toteuttamisen ohella muutoksia tapahtuu runkobussilinjoja täydentävissä joukkoliikennelinjoissa. Runkobussilinjoja täydentävien linjojen osalta näkyvämpiä muutoksia ovat linjojen uusi numerointi, joka on otettu käyttöön vaiheittain kesästä 2014 alkaen. Runkobussilinjoille on varattu linjanumerot 1-19, joista otetaan runkobussilinjastosuunnitelman mukaisesti käyttöön linjanumerot 1-3 ja 5-9. Runkobussilinjoja täydentävien linjojen numerointi alkaa 20:stä ja päättyy 100:n ylittäviin numeroihin. Täydentävien linjojen numerointi noudattaa seuraavia periaatteita:

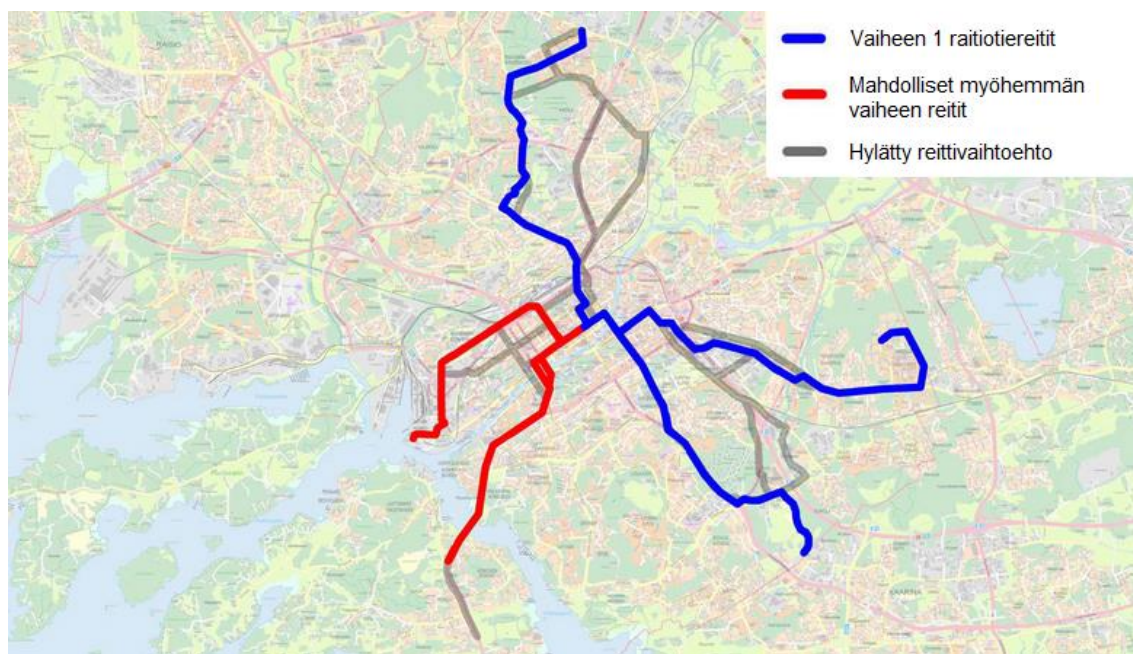
- linjat 20–39 ovat Turun kaupungin sisäisiä heilurilinjoja
- linjat 40–59 ovat Turun kaupungin sisäisiä Kauppatorille päättyviä säteislinjoja
- linjat 60–69 ovat poikittaislinjoja
- linjat 70–79 ovat seutuliikenteen heilurilinjoja
- linjat 80–99 ovat seutuliikenteen Kauppatorille päättyviä linjoja
- 100:n ylittävät linjat ovat erikoislinjoja, kuten työmatka- ja koululaislinjoja
- linjat N1-N9 ovat yölinjoja. (Luonnos 2012)

Edellä mainittuja runkobussilinjoja sekä niitä täydentäviä joukkoliikennelinjoja koskevien muutosten lisäksi Turun seudun joukkoliikenneverkolla toteutetaan suuri määrä infratoimenpiteitä. Infratoimenpiteet koskevat joukkoliikennekaistoja ja -katuja, joukkoliikenteen liikennevaloetuksia, bussipysäkkejä, pyörien liityntäpysäköintiä sekä matkustajainformaatiota. Joukkoliikenneverkolla toteutettavat infratoimenpiteet luovat edellytykset runkobussiliikennöinnille. (Luonnos 2012)

Runkobussilinjasto on kuitenkin vain välivaihe edetessä kohti joukkoliikennejärjestelmää, jossa voimakkaimmilla joukkoliikennelinjoilla liikennöidään tulevaisuudessa raitiovaunuilla. Suunnitelmien mukaan raitiovaunuilla korvattaisiin tulevaisuudessa runkobussilinjat 1 Satama-Kauppatori, 2 ja 2A Länsinummi-Kauppatori, 3A ja 3B Varissuo-Kupittaaan asema-Kauppatori, 5, 5A, 5B ja 5C Moikoinen-Kauppatori ja 9 Skanssi-Kauppatori. Luvussa 3.2.3. on esitetty tarkemmin Turun raitiotien yleissuunnitelma. (Turun raitiotie)

3.2.3. Turun raitiotie

Turun raitiotien ensimmäisen vaiheen yleissuunnittelu aloitettiin tammikuussa 2013. Turun raitiotielle asetettiin tavoitteet keväällä 2013 ja suositukset parhaiksi raitiotiereiteiksi esitettiin tammikuussa 2014. Raitiotien yleissuunnitelman ensimmäisessä vaiheessa vertailtiin reittivaihtoehtoja Hirvensaloon, Linnankaupunkiin, Runosmäkeen, Skanssiin ja Varissuolle. Reittivaihtoehtojen vertailun jälkeen päädyttiin esittämään 28.2.2014 Turun raitiotien ensimmäiseksi vaiheeksi kolmihaaraista raitiotieverkkoa, joka kulki Kauppatorilta Runosmäkeen, Skanssiin ja Varissuolle. Tavoitteena on tehdä päätös raitiotien ensimmäisen vaiheen rakentamisesta alkuvuonna 2015. (Turun raitiotie) Kuvassa 7 on esitetty Turun raitiotien yleissuunnitelma.



Kuva 7 Turun raitiotien yleissuunnitelma. (Turun raitiotie)

Runosmäen raitiotien linjaukseksi päädyttiin esittämään Kauppatorilta Nättinummen kautta Runosmäkeen kulkevaa reittiä. Reittivaihtoehto on kustannuksiltaan halvin, maaperältään paras ja sen varrella asuu eniten asukkaita. Skanssin reittivaihtoehtoista valittiin rakennus- ja operointikustannuksiltaan halvempi sekä liikennöinniltään luotettavampi ja nopeampi reitti Kauppatorilta Uudenmaantietä pitkin Skanssiin. Varissuon raitiotien reittivaihtoehtojen väliset erot olivat melko vähäisiä ja jatkoon valittiin Kauppatorilta Joukahaisenkatua, Voimakatua ja Littoistentietä pitkin Varissuolle kulkeva reitti. (Turun raitiotien yleissuunnitelma 2014)

Mahdolliset myöhemmän suunnittelu- ja toteutusvaiheen reitit kulkisivat Hirvensaloon ja Linnankaupunkiin. Hirvensalon raitiotien esitettiin kulkevan Kauppatorilta Martinsillan ja Myllynsillan kautta Stålminkatua ja Hirvensalon puistotietä pitkin Hirvensaloon. Linnankaupungin raitiotien reittivaihtoehtoista jatkosuunnitteluun esitettiin luotettavinta ja nopeinta reittivaihtoehtoa Humalistonkadun, Ratapihankadun ja Iso-Heikkilän kautta Satamaan. (Turun raitiotien yleissuunnitelma 2014)

Turun raitiotien ensimmäiseksi vaiheeksi päädyttiin esittämään Runosmäkeen, Skanssiin ja Varissuolle kulkevaa raitiotieverkkoa, koska raitiotien ensimmäisen vaiheen on oltava kustannustehokas ja toteuttamiskelpoinen ja raitiotien paras potentiaali löytyy valituilta reiteiltä. Hirvensalon ja Linnankaupungin suunnittelua ei jatketa tässä vaiheessa pienemmästä matkustajapotentiaalista ja heikommasta linjojen laajennettavuudesta johtuen. Valitut raitiotielinjat yhdistävät asukkaiden ja työpaikkojen sijainnin sekä tarjoavat mahdollisuuden Runosmäen ja Skanssin raitiotielinjojen laajentamiselle Raisioon ja Kaarinaan. Laajentamalla raitiotieverkkoa Raisioon ja Kaarinaan katettaisiin verkolla Turun, Raision ja Kaarinan kuntakeskukset sekä suurin osa työpaikkakeskittymistä ja liikenneterminaaleista. (Esiteitys jatkosuunnitteluun 2014)

4 SÄHKÖBUSSIT

4.1 Perussuureet

Sähköbussin perussuureita ovat sähköbussin koko, käyttöikä, matkustajakapasiteetti, sähkönkulutus, akkutyypin ja -kapasiteetti, latausmenetelmä ja käyttökonsepti. Kyseiset perussuureet on määritetty tätä tutkimusta varten ja näin ollen muissa tutkimuksissa esitetyt perussuureet voivat erota tässä tutkimuksessa esitetyistä perussuureista. Perussuureille ei voida määrittää tarkkoja vakioarvoja, vaan perussuureet vaikuttavat toinen toisiinsa. Yhden perussuureen valitseminen vaikuttaa aina muihin valittaviin perussuureisiin. Sähköbussien yleistyminen ja sähköbussikalustotekniikan sekä akku- ja sähköteknologian kehitys tulevat myös muuttamaan perussuureita lähitulevaisuudessa. Luvuissa 4.2–4.6 on tutkittu tarkemmin taulukossa 6 esitettyjä perussuureita.

Taulukko 6 Sähköbussin perussuureet. (Batteriebus Wien 2014; Battery University; Ebusco Home; Ruotsalainen, S. 2012; Siemens 2014; VTT 2013)

Sähköbussi	Koko	8-12 m
	Käyttöikä	15 vuotta
	Matkustajakapasiteetti	10-40 istumapaikkaa
	Sähkönkulutus	1,5 kWh/km
Akku	Kapasiteetti	< 100 kWh
	Tyyppi	LFP/LTO
	Paino	8-14 kg/kWh
	Hinta	500-2000 €/kWh
Latausmenetelmät		Kaapelilataus Virroitinlataus Induktiolataus Akunvaihto
Käyttökonseptit		Varikkolataus Pikalataus Yhdistelmälataus

Sähköbussien koko on nykyään sähköbussiliikennöintiä ja matkustajakapasiteettia rajoittava tekijä, mutta tulee varmasti kehittymään positiiviseen suuntaan lähitulevaisuudessa. Tällä hetkellä sähköbusseja on saatavana 8-12-metrinä ja niiden paino vaihtelee rungon painosta sekä tarvittavasta akkukapasiteetista riippuen 8-9-metrillä busseilla 8000–12000 kg välillä ja 12 metrisillä busseilla 10500–14000 kg välillä. Tällä hetkellä markkinoilla olevissa sähköbusseissa on 10–40 istumapaikkaa ja kokonaismatkustajakapasiteetti vaihtelee 40–100 matkustajan välillä. Sähköbussien koko ei siis vie-

lä vastaa kaupunkiliikenteessä käytettävien telibussien kokoa, mutta sen saavuttaminen lähitulevaisuudessa ei tule olemaan ongelma. Markkinoilla olevaa sähköbussikalustoa on tutkittu tarkemmin luvuissa 4.5–4.6.

Sähköbussien sähkönkulutus vaihtelee todella paljon riippuen tutkittavasta sähköbussista sekä lämpötilasta liikennöinnin aikana. VTT:n lähteiden mukaan sähköbussin sähkönkulutus on noin 1 kWh/km ja Siemensin lähteiden mukaan kulutus on 1–2 kWh/km (Siemens 2014; VTT 2013). Wienissä liikennöivien Siemens/Rampini-sähköbussien sähkönkulutus vaihtelee 1,2–2,5 kWh/km välillä sen mukaan liikennöidäänkö sähköbussilla kesällä vai talvella (Batteriebus Wien 2014). Muiden markkinoilla olevien sähköbussien sähkönkulutus vaihtelee kalustovalmistajien ilmoittamien tietojen mukaan 0,9–1,6 kWh/km välillä. Tässä diplomityössä sähköbussin keskimääräisenä sähkönkulutuksena käytetään 1,5 kWh/km.

Akkukapasiteetti vaikuttaa merkittävästi sähköbussin painoon, matkustajakapasiteettiin ja hankintahintaan. Akkukapasiteetin tarve lisää sähköbussin painoa. Sähköbussin paino on taloudellista pitää mahdollisimman alhaisena, koska painon lisääminen nostaa sähköbussin sähkönkulutusta ja katuinfrastruktuurin kuormitusta. Katuinfrastruktuurin kuormituksen lisääminen kuluttaa katuja ja aiheuttaa nopeammasta katujen saneeraus-tarpeesta johtuen lisäkustannuksia katuinfrastruktuurin kunnossapitoon. Suuri akkukapasiteetti vaatii myös paljon tilaa bussissa, mikä pienentää matkustajakapasiteettia. Akkukapasiteetti nostaa sähköbussin hankintahintaa 500–2000 € jokaista tarvittavaa kilowattituntia kohden.

VTT:n tutkijoiden mukaan sähköbussin akkukapasiteetin hyvänä suuruutena voidaan pitää 40–60 kWh (Samu Kukkonen & Veikko Karvonen 2014). Sähköbussitekniikan varhaisessa kehitysvaiheessa ja sähköbussiliikennöintiin kehittymättömässä joukko-liikennejärjestelmässä on kuitenkin hyväksyttävä hieman suuremmat akkukapasiteetin arvot. Tässä diplomityössä tavoitellaan korkeintaan 100 kWh akkukapasiteettia.

Sähköbussissa yleisimmin käytetty akkutyyppeä on litiumrautafosfaattiakku (LFP). Tulevaisuudessa myös litiumtitanaattiakun (LTO) käyttö sähköbussissa tulee todennäköisesti yleistymään. Sähköbussissa voidaan käyttää myös muita akkutyyppejä, joiden tutkiminen on jätetty tämän diplomityön ulkopuolelle. Akkutyyppejä on tutkittu tarkemmin luvussa 4.2. Sähköbussin latausmenetelmiä ovat kaapeli-, virroitin- ja induktiolataus sekä akunvaihtojärjestelmä. Latausmenetelmiä on tutkittu tarkemmin luvussa 4.3. Sähköbussin käyttökonsepteja ovat varikkolataus, pikalataus ja yhdistelmälataus. Käyttökonsepteja on tutkittu tarkemmin luvussa 4.4.

4.2 Akkutyypit

Sähköbussin akkutyypillä on suuri merkitys sähköbussiliikennöintiin. Akkutyyppeä ja sen ominaisuudet vaikuttavat sähköbussin akkukapasiteettiin, lataustaajuuteen, lataustehoon, purku-lataussyklin syvyyteen, käyttökonseptiin, mahdollisiin liikennöinti- ja latausolosuhteisiin sekä hankinta- ja liikennöintikustannuksiin. Tässä diplomityössä tutki-

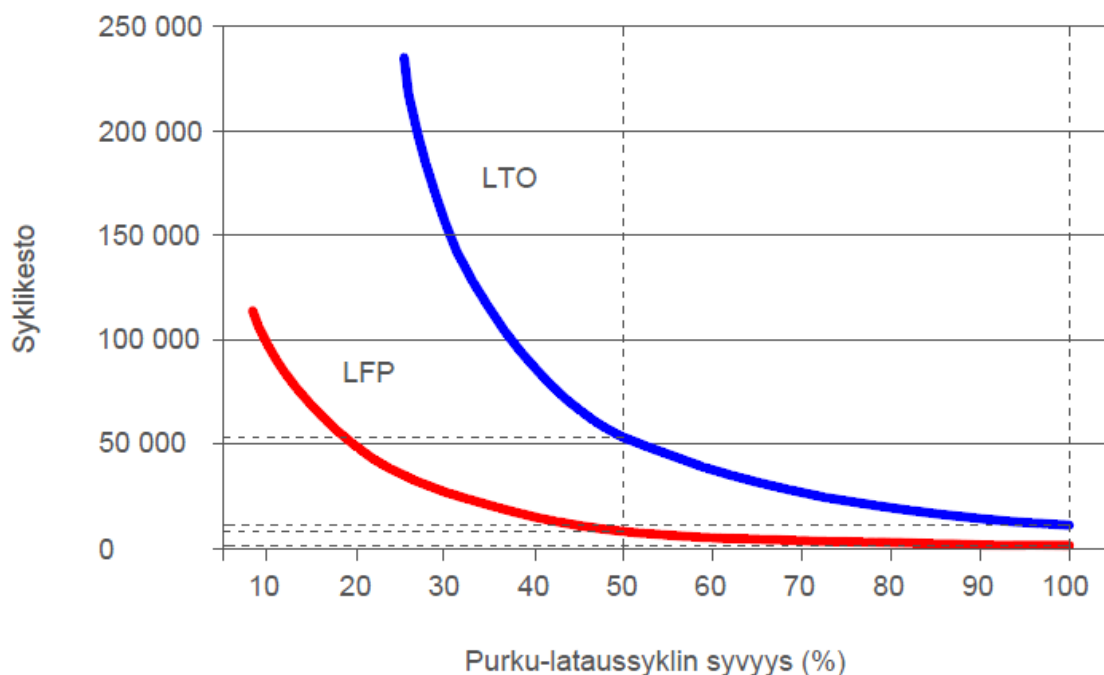
tut akkutyypit ovat litiumrauta-fosfaattiakku ($\text{LiFePO}_4/\text{LFP}$) ja litiumtitanaattiakku ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}/\text{LTO}$). Molemmat akkutyypit ovat litiumioniakkuja (Li-ion). Kyseisten akkutyypien ominaisuuksia tutkitaan akkujen syklikeston, toimintalämpötilaikkunan, energia- ja tehotehden sekä hinnan osalta.

Litium on kevyin tunnettu metalli ja sillä on kaikista tunnetuista alkuaineista korkein normaalipotentiaali. Litiumin korkean normaalipotentiaalin ansiosta litium-akuilla on erittäin korkea energiatiheys. Litium metallin luontaisen epävakauden takia Li-ion-akut eivät kuitenkaan sisällä litiumia metallisessa muodossa, vaan akuissa käytetään litium-ioneja. Litium-ionien normaalipotentiaali on litium metallin normaalipotentiaalia alhaisempi, mutta ionien käyttö lisää merkittävästi akkujen turvallisuutta. Li-ion-akkujen turvallisuus ja korkea energiatiheys mahdollistavat niiden käytön sähköajoneuvojen energianlähteenä. (Battery University)

Akun elinikää kuvastava suure on akun syklikesto. Syklikesto tarkoittaa purkulataussykliä määrää, jonka akku kestää kunnes akun alkuperäisestä kapasiteetista on jäljellä 80 %. Akku on todennäköisesti toimintakykyinen vielä syklikeston loputtua, mutta akkua on turvallista käyttää 80 % rajaansa saakka. Akkutyypille ilmoitettu syklikesto ei kuitenkaan yksinään ole akun eliniän mittari, vaan akun elinikään vaikuttaa myös akun käyttötapa. Akkutyypille ilmoitettu syklikesto vaihtelee riippuen akun purkulataussyklin syvyydestä, lataustehosta ja lämpötilasta liikennöinnin aikana. (Battery University; Biomeri Oy 2009)

Purku-lataussyklin syvyys on olennainen LFP-akun elinikään vaikuttava tekijä. LFP-akun purkautuessa akun rakenne supistuu ja latautuessa akun rakenne laajenee. Supistuminen ja laajeneminen on voimakkainta LFP-akun varaustason ääripäissä eli varaustason ollessa lähellä maksimia tai minimiä. Akun rakenteen jatkuva supistuminen ja laajeneminen lyhentävät akun elinikää ja tästä johtuen LFP-akun varaustaso on hyvä pitää keskimäärin 30–80 prosentin välillä. Näin voidaan minimoida akun supistumisesta ja laajenemisesta aiheutuva mekaaninen rasitus ja maksimoida akun elinikä. Purku-lataussyklin syvyydellä ei ole samanlaista vaikutusta LTO-akkuihin. (Samu Kukkonen & Veikko Karvonen 2014)

Purku-lataussyklin syvyyttä kannattaa kuitenkin rajoittaa myös LTO-akkuja käytettäessä. Näin tehtäessä akkutyypille ilmoitettu syklikesto kasvaa, koska akkukapasiteettia ei enää pureta ja ladata koko akkukapasiteetin mahdollistamassa skaalassa. Karkean arvion mukaan akun syklikesto kasvaa jopa 350 prosenttia rajoitettaessa akun purku-lataussyklin syvyyttä 100 prosentista 50 prosenttiin (Altairnano; Samu Kukkonen & Veikko Karvonen 2014). Karkea arvio purku-lataussyklin syvyyden vaikutuksesta akun syklikestoon on esitetty kuvassa 8. Kuvassa 8 LTO-akun syklikeston kasvu on esitetty sinisellä käyrällä ja LFP-akun syklikeston kasvu punaisella käyrällä. Lähtökohtana on käytetty LTO-akulla 12000 sykliä ja LFP-akulla 2000 sykliä.



Kuva 8 Purku-lataussyklin syvyyden vaikutus akun syklikestoon. (Altairnano; Samu Kukkonen & Veikko Karvonen 2014)

Purku-lataussyklin syvyyden vaikutuksesta akun syklikestoon ei kuitenkaan olla alan asiantuntijoiden keskuudessa täysin yksimielisiä. Joidenkin asiantuntijoiden mukaan akun syklikeston kasvu suhteessa purku-lataussyklin syvyyteen on lineaarista edellä esitetyn eksponentiaalisen kasvun sijaan. Tällöin akun syklikesto kasvaa 100 prosenttia rajoitettaessa akun purku-lataussyklin syvyyttä 100 prosentista 50 prosenttiin. Tässä diplomityössä on kuitenkin päädytty käyttämään eksponentiaalista kasvukäyrää LFP- ja LTO-akun eliniän arviointiin. Akkutyypin elinikää arvioitaessa on myös huomioitu purku-lataussykliä määrän kasvu purku-lataussyklin syvyyttä rajoitettaessa.

Lataustehon vaikutus akkujen elinikään perustuu siihen, että lataustehon kasvaessa akku lämpenee. Akun lämmitessä Li-ion-akussa tapahtuvat haitalliset akkua vaurioittavat sivureaktiot lisääntyvät ja näin ollen akun elinikä lyhenee. Haitalliset sivureaktiot ovat akussa myös suurimmillaan silloin kun akun varaustaso on lähellä 100 prosenttia. Pikalatauksessa käytettävien suurten lataustehojen vaikutuksesta akkujen elinikään ei kuitenkaan ole tarkkaa tietoa. VTT:n tutkija Samu Kukkosen mielestä akun elinikään merkittävimmin vaikuttava asia on purku-lataussyklin syvyys ja pikalatauksen vaikutus elinikään on vähäisempi. (Samu Kukkonen & Veikko Karvonen 2014)

Tärkeimpiä sähköbussin akkujen tunnuslukuja ovat energiatiheys (Wh/kg) ja tehotehiheys (W/kg). Energiateiheys ja tehotehiheys ovat osittain toisensa poissulkevia ominaisuuksia eli toisen ominaisuuden parantaminen huonontaa yleensä toista ominaisuutta. Akun tehotehiheyden ollessa suuri akkua voidaan purkaa ja ladata suurella teholla. Tällöin kuitenkin akun sisäisistä johdotuksista on tehtävä paksumpia häviöiden minimoimiseksi. Tämä vie tilaa energian varastointiin tarkoitetulta materiaaalilta ja näin ollen laskee akun energiatihelyttä. Suuren energiatihetyden omaavia akkuja ei voida purkaa ja ladata

suurella teholla, sillä näin tehtäessä sekä akun hyötysuhde että elinikä muodostuvat ongelmaksi. (Biomeri Oy 2009)

Sähköbussseissa yleisimmin käytetty akkutyyppe on LFP-akku. Akun syklikesto on 1000–3000 purku-lataussykliä ja toimintalämpötilaikkuna $-20\text{ °C} - +60\text{ °C}$. LFP-akun latauslämpötilaikkuna on kuitenkin vain $0\text{ °C} - +45\text{ °C}$, mikä tekee mahdottomaksi akun lataamisen pakkasella. LFP-akun energiatiheys on 90–120 kWh/kg ja näin ollen akku painaa 8-11 kg/kWh. Akun tehotiheys on 200–900 W/kg. LFP-akut maksavat tällä hetkellä 500–1000 €/kWh. Hyvän LFP-akun hinta on noin 1000 €/kWh. (Battery University; Biomeri Oy 2009; VTT 2013)

Akkuteknologia kehitty jatkuvasti ja tulevaisuudessa LTO-akun käyttö sähköbussseissa tulee todennäköisesti yleistymään. Akun syklikesto on yli 12000 purku-lataussykliä (2C, 25 °C) ja akun toimintalämpötilaikkuna on jopa $-40\text{ °C} - +65\text{ °C}$. LTO-akku voidaan ladata 80 prosenttiin sen kapasiteettista -30 °C lämpötilassa. Akun energiatiheys on 70–115 Wh/kg ja näin ollen akku painaa 9-14 kg/kWh. LTO-akun tehotiheys on 760–1250 W/kg. Hyvän LTO-akun hinta on noin 2000 €/kWh. (Battery University; Ruotsalainen, S. 2012) Taulukossa 7 on esitetty LFP- ja LTO-akkujen ominaisuudet.

Taulukko 7 LFP- ja LTO-akkujen ominaisuudet. (Battery University; Biomeri Oy 2009; Ruotsalainen, S. 2012; VTT 2013)

Ominaisuus		Akkutyyppe	
		LFP	LTO
Syklikesto		1000-3000	> 12000
Lämpötila- ikkuna	Käyttö	$-20\text{ °C} - +60\text{ °C}$	$-40\text{ °C} + 65\text{ °C}$
	Lataus	$0\text{ °C} - +45\text{ °C}$	$-30\text{ °C} \rightarrow$
Energiatiheys		90-120 Wh/kg	70-115 Wh/kg
Paino		8-11 kg/kWh	9-14 kg/kWh
Tehotiheys		200-900 W/kg	760-1250 W/kg
Hinta		500-1000 €/kWh	2000 €/kWh

LFP- ja LTO-akkujen suurimmat erot ovat niiden syklikesto ja toimintalämpötilaikkuna. LTO-akkujen syklikesto on markkinoiden paras ja akut omaavat hyvin laajan toimintalämpötilaikkunan (Ruotsalainen, S. 2012). Laajan toimintalämpötilaikkunan lisäksi LTO-akkuja voidaan ladata jopa -30 °C lämpötilassa. LTO-akuilla voidaan saavuttaa yli nelinkertainen purku-lataussyklien määrä verrattuna nykyisin sähköbussseissa yleisimmin käytettyihin LFP-akkuihin.

Syklikesto on hyvin tärkeä tekijä sähköbussin liikennöintikustannusten muodostajana. Mitä lyhyempi on akun syklikesto, niin sitä nopeammin ilmenee tarve ostaa sähkö-

bussiin uudet akut. Sähköbussisiin hankittavien akkujen hinta voi olla dieselbussien hankintahinnan suuruinen, jolloin on erittäin tärkeää taata akuille pitkä elinikä. Sähköbussiin hankittavien akkujen hinta on kuitenkin suoraan verrannollinen hankittavien akkujen määrään. Mitä pienempää lataustaajuutta käytetään, niin sitä enemmän akkukapasiteettia ja akkuja tarvitaan. Suurennettaessa lataustaajuutta tarvittavien akkujen määrä pienenee huomattavasti. Pika- tai yhdistelmälatauskonseptia käytettäessä tarvittavien akkujen määrää saadaan pienennettyä myös latausaikaa tai lataustehoa kasvattamalla.

Toimintalämpötilaikkunan osalta olennaisin ero LFP- ja LTO-akkujen välillä on niiden käytettävyys ja ladattavuus alhaisissa lämpötiloissa. Suomen liikennöintiolosuhteita ajatellen LFP-akun toimintalämpötilaikkuna ei riitä kaikkein kovimmilla pakkasilla ja akun latauslämpötilaikkuna ei mahdollista akun lataamista pakkasella. Tämä tuottaa todennäköisesti suuria ongelmia Suomen talviolosuhteissa. LTO-akun erittäin laaja toimintalämpötilaikkuna takaa akkujen käytettävyyden niin kesällä kuin talvellakin ja akkujen latausmahdollisuus jopa $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilassa mahdollistaa lataamisen myös kovilla pakkasilla. Akkujen käyttö ja lataaminen niiden lämpötilaikkunoiden ääripäissä voi kuitenkin lyhentää akkujen elinikää.

LFP-akkujen suppeampi toiminta- ja latauslämpötilaikkuna eivät kuitenkaan poisulje niiden käyttömahdollisuutta pakkasella. Akkujen hyvällä eristämällä ja lämmittämällä voidaan kasvattaa akkujen lämpötilaikkunoita ja mahdollistaa niiden käyttö myös Suomen talviolosuhteissa. Akkujen eristäminen ja lämmittäminen lisäävät kuitenkin akkujen hankintakustannuksia ja akkujen lämmittäminen kasvattaa sähköbussin sähkönkulutusta.

LFP-akkujen hyvänä puolena on niiden suuri energiatiheys, joka mahdollistaa sähköbussien suuren akkukapasiteetin. Suurelle akkukapasiteetille on tarvetta silloin kun lataustaajuus on pieni ja yhdellä latauksella liikennöidään jopa satoja kilometrejä. Akkukapasiteetin suuruuden merkitys pienenee kuitenkin operoinnin aikaista pikalatausta käytettäessä. Akkukapasiteetti pyritään pitämään mahdollisimman pienenä sähköbussin hankintakustannusten ja painon minimoimiseksi sekä matkustajakapasiteetin maksimoimiseksi.

LTO-akkujen energiatiheys on selvästi LFP-akkujen energiatheyttä pienempi. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että 1 kWh energiaa LTO-akuilla painaa noin 2 kg enemmän kuin LFP-akuilla ja sama energiamäärä vie myös enemmän tilaa. Näin ollen LTO-akkuja ei voida käyttää pienellä lataustaajuudella, aiheuttamatta sähköbussikalustolle suurta lisäpainoa ja matkustajakapasiteetin laskua. LTO-akut sopivatkin parhaiten käytettäväksi pika- ja yhdistelmälatauskonseptiin niiden suuren tehotiheyden ansiosta. Pikalatausta käytettäessä pienemmällä energiatheydellä ei ole niin suurta merkitystä, koska pika- ja yhdistelmälatauskonseptissa lataustaajuus voidaan pitää suurena ja tällöin tarvittavan akkukapasiteetin määrä on pieni.

LTO-akkujen tehotiheys on LFP-akkujen tehotiheyttä suurempi. Näin ollen LTO-akkuja pystytään lataamaan suuremmalla teholla kuin LFP-akkuja. LFP-akkuja pysty-

tään lataamaan 1C arvolla ja LTO-akkuja 4C arvolla. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että akkukapasiteetin ollessa 100 kWh LFP-akkuja voidaan ladata korkeintaan 100 kW latausteholla ja LTO-akkuja korkeintaan 400 kW latausteholla. Tässä diplomityössä LTO-akut on kuitenkin mitoitettu ladattavaksi korkeintaan 2C arvolla. Ladattaessa LTO-akkuja 2C arvolla akulle luvataan yli 12000 purku-lataussyklin syklikestoa 25 °C lämpötilassa, mutta tätä suuremmilla C arvoilla ladattaessa LTO-akkujen syklikesto pienenee.

Energia- ja tehotiheys vaikuttavat sähköbussin akkukapasiteettiin, lataustaajuuteen ja käytettävään lataustehoon. Pientä lataustaajuutta käytettäessä sähköbusseilta vaaditaan suurta akkukapasiteettia, joka nostaa huomattavasti sähköbussin hankintakustannuksia ja painoa sekä pienentää matkustajakapasiteettia. Suuri lataustaajuus taas mahdollistaa pienemmän akkukapasiteetin. Jos kuitenkin suurta lataustaajuutta käytettäessä on siirryttävä pienitehoisen latauksen käytöstä suuritehoiseen pikalataukseen, voi pikalatauksen mahdollistavan akkuteknologian kallis hinta nostaa sähköbussin hankintakustannuksia. Sähköbussikalustoa hankittaessa on myös huomioitava latausinfrastruktuurin kustannukset, jotka nousevat lataustaaajuuden ja -tehon suurentuessa.

Akusto on sähköbussien kallein yksittäinen osa. Sekä LFP- että LTO-akut ovat kalliita, mutta LTO-akut vielä LFP-akkujakin kalliimpia. Sähköajoneuvojen yleistyessä ja akkujen massatuotannon alkaessa akkujen hinnat tulevat kuitenkin putoamaan merkittävästi. VTT arvioi sähköautojen akkujen hinnan olevan 2020-luvulla noin 300 €/kWh, mutta korostaa sitä, että sähköbusseissa käytettävät akut tulevat olemaan sähköautoissa käytettäviä akkuja kalliimpia. Asiantuntijat eivät kuitenkaan uskalla antaa tarkkoja arvioita LFP- tai LTO-akkujen hintakehityksestä tulevaisuudessa. Joidenkin arvioiden mukaan sähköbusseissa käytettävien akkujen hinnat voivat laskea puoleen 2020-luvulle siirryttäessä.

LTO- ja LFP-akut ovat monilta ominaisuuksiltaan hyvin erilaisia ja ne soveltuvat erilaisiin käyttötarkoituksiin. LTO-akun energiatiheys on huomattavasti LFP-akun energiatheyttä alhaisempi, mutta muilta ominaisuuksiltaan LTO-akkua voidaan pitää LFP-akkua kehittyneempänä. LTO-akut tulevat todennäköisesti yleistymään tulevaisuudessa varsinkin niiden hyvän syklikeston, laajan toimintalämpötilaikkunan ja suuren tehosiheyden ansiosta. Kyseisillä ominaisuuksilla mahdollistetaan akkujen pitkä elinikä, liikennöinti tarvittavissa lämpötilaolosuhteissa sekä sähköbussiliikennöinnin pikalataus-konsepti. LTO-akun hinta on kuitenkin vielä kaksinkertainen LFP-akun hintaan verrattuna, mutta tulevaisuudessa molempien akkujen hinnat tulevat laskemaan merkittävästi.

4.3 Latausmenetelmät

4.3.1. Kaapelilataus

Kaapelilataus tarkoittaa kaapelilla kytkettävää langallista latausta (VTT 2013). Kaapelilataus ei ole automaattinen latausmenetelmä, vaan latauksen suorittamiseksi latauskaapeli on kytkettävä käsin sähköbussiin. Useiden asiantuntijoiden mielestä linja-

autonkuljettajaa ei voida velvoittaa kytkemään latauskaapeleita, jolloin latausmenetelmän käyttö operoinnin aikana muodostuu mahdottomaksi. Näin ollen kaapelilataus soveltuu parhaiten varikkolataukseen. Varikolla sähköbussien huoltohenkilökunta voi hoitaa latauskaapeleiden kytkemisen.

Kaapelilataus on hidas latausmenetelmä, jossa käytettävä latausteho on korkeintaan 90 kW. Kaapelilataus voidaan suorittaa jakeluverkkoon liitettyä teollisuuskaapelia käyttäen tai hankkimalla varikolle kaapelilataukseen tarkoitettu latauslaite. Kaapelilatauslaitteet eivät kuitenkaan ole vielä standardoituja ja tästä syystä kaapelilataustapoja on useita. Sähköbusseille soveltuvimmat lataustavat ovat CHAdeMO ja Combo2. Näiden lisäksi useilta kaapelilatauslaitteiden valmistajilta on saatavilla latauslaitteita, jotka tukevat Mode 3 Type 2 standardia. (Samu Kukkonen & Veikko Karvonen 2014; VTT 2013)

Asiantuntijoiden mukaan sähköbussit tulevat todennäköisesti seuraamaan sähköautojen latausstandardeja. Sähköautojen kaapelilatauslaitteet tukevat Combo2 standardia, joka on otettu käyttöön keväällä 2014. Sähköbussit käyttävät kuitenkin vielä useita eri kaapelilataustapoja, eivätkä sähköbussivalmistajat tue mitään tiettyä latausstandardia. Tästä johtuen varikolle hankittavan kaapelilatauslaitteen tulisi sisältää sekä CHAdeMO, Combo2 että Mode 3 Type 2 standardit. (Samu Kukkonen & Veikko Karvonen 2014)

Kaapelilatauslaite on suorakulmion muotoinen noin 2 metriä korkea laite, jonka ulkomuotoa voi verrata bensapumppuun. Kaapelilatauslaitteiden ulkomuoto kuitenkin vaihtelee eri valmistajien välillä. Kaapelilatauslaitteiden valmistajia ovat esimerkiksi ABB, Circutor, DBT, Efacec ja Schneider. (VTT 2013)

Kaapelilatausta käytettäessä latausinfrastruktuuri on helppo ja nopea käyttöönottaa ja latausinfrastruktuurin hankintakustannukset ovat pienet. Yksin käytettynä kaapelilatausmenetelmä aiheuttaa kuitenkin suuren investointitarpeen sähköbussin akkukapasiteettiin. Tämä johtuu siitä, että jos sähköbusseja ladataan vain varikolla kaapelilatausta käyttäen, on lataustaajuus erittäin pieni ja tällaisen sähköbussiliikennöinnin mahdollistaminen vaatii suuren akkukapasiteetin. Suuri akkukapasiteetti taas nostaa sähköbussin hankintakustannuksia.

4.3.2. Virroitinlataus

Virroitinlatauksella tarkoitetaan sähköbussin yläpuolelta tapahtuvaa latausta. Virroitinlataus on automaattinen latausmenetelmä, jota voidaan käyttää sekä varikkolataukseen että operoinnin aikaiseen pikalataukseen. Virroitinlataus voidaan suorittaa ratikan johdinverkosta tai virroitinlataukseen tarkoitettulla latauslaitteella. Molemmissa tapauksissa bussin katolta nousevat virroittimet kytkeytyvät automaattisesti johdinverkkoon/latauslaitteeseen. (VTT 2013)

Virroitinlataus on nopea latausmenetelmä, jossa käytettävä latausteho on korkeintaan 400 kW (VTT 2013). Käytettävä latausteho määräytyy kuitenkin sen mukaan missä tilanteessa virroitinlatausta käytetään. Varikkolatausta suoritettaessa virroitinlataustehot

ovat alle 100 kW, mutta operoinnin aikaisessa pikalatauksessa tarvittavat lataustehot ovat usein 100–400 kW. Virroitinlataus voidaan suorittaa matkustajien ollessa bussin kyydissä ja näin ollen operoinnin aikainen pikalataus on mahdollinen sekä joukkoliikennelinjan kääntöpaikoilla että bussipysäkeillä.

Virroitinlatauslaitteet ovat uutta teknologiaa ja niiden tuotanto on vasta kokeiluvaiheessa. Virroitinlatauslaitteet ovat suljettuja järjestelmiä, eikä virroitinlatausstandardeja ole olemassa. Näin ollen ne eivät ole yhteensopivia kaikkien sähköbussien kanssa. Virroitinlatauslaitetta hankittaessa onkin huomioitava käytettävän sähköbussin yhteensopivuus latauslaitteen kanssa. Käytännössä sekä latauslaite että sähköbussiin asennettava lataustehon vastaanottava laite on hankittava samalta valmistajalta. (Samu Kukkonen & Veikko Karvonen 2014)

Investointi suljettuun järjestelmään on kuitenkin suuri riski, sillä standardien puuttuessa kenelläkään ei ole täyttä varmuutta siitä, mitä latausjärjestelmää tuleva standardi tulee noudattamaan. Vähitellen markkinoille tulee kuitenkin yrityksiä, jotka näkevät standardoinnin potentiaalin. Kyseiset yritykset kehittävät avoimia virroitinlatausjärjestelmiä, joihin tuleva latausstandardi tulee perustumaan. Asiantuntijoiden arvion mukaan virroitinlatauslaitteiden standardointi kestää kuitenkin vielä 3–4 vuotta. Ennen latausstandardin valmistumista markkinoilla on kuitenkin todennäköisesti saatavilla virroitinlatauslaitteita, jotka noudattavat tulevaa standardia. (Samu Kukkonen & Veikko Karvonen 2014)

Virroitinlatauslaitteet ovat yli 3 metriä korkeita kohtuullisen paljon tilaa vieviä laitteita. Virroitinlatauslaitteiden ulkomuoto on kuitenkin monilta osin räätälöitävissä tilaajan maun mukaan. Virroitinlatauslaitteet voidaan integroida osaksi pysäkki-infraa, jolloin latauslaite on matkustajalle huomaamaton osa joukkoliikenneinfrastruktuuria. Sähköbussin asemointi virroitinlatauslaitteelle on kohtuullisen helppoa. Virroitinlatauslaitteen virroittimien sivusiirtymä on noin 0,5 metriä ja pituussiirtymä useita metrejä. Bussin asemointia latauslaitteelle voidaan helpottaa kameroiden ja tiemerkinntöjen avulla. Virroitinlatauslaitteiden valmistajia ovat esimerkiksi ABB ja Siemens. (Jukka Mäkinen 2014; Tuomas Humalajoki 2014)

Virroitinlatauslaitteiden hinnoista ei ole vielä tarkkaa tietoa, koska latauslaitteiden tuotanto on vasta kokeiluvaiheessa. Latauslaitteiden hinnat vaihtelevat myös eri laitevalmistajien välillä. Virroitinlatausta käytettäessä latausinfrastruktuurin hankintakustannukset ovat kuitenkin huomattavasti suuremmat kuin kaapelilatausta käytettäessä. Tässä diplomityössä virroitinlatauslaitteen karkeana hinta-arviona on käytetty 400 000 €. Latauslaitteen hinta on korkea, mutta operoinnin aikaista virroitinlatausta hyödynnetessä sähköbussien akkukapasiteetti voidaan pitää pienenä, jolloin sähköbussin hankintakustannukset saadaan minimoitua.

4.3.3. Induktiolataus

Induktiolatauksella tarkoitetaan sähköbussin alapuolelta tapahtuvaa latausta. Induktiolataus on automaattinen latausmenetelmä, jota voidaan käyttää sekä varikkolataukseen että operoinnin aikaiseen pikalataukseen. Induktiolataus tapahtuu maahan asennettavan ensiökäämin ja bussiin asennettavan toisiokäämin välillä ilman kosketuspintaa. Maahan asennettavan ensiökäämin mitat vaihtelevat käytettävän lataustehon mukaan. Lataustehon ollessa 100–200 kW ensiökäämin pituus on 3-5 metriä, leveys 1-2 metriä ja tarvittava asennussyvyys noin 1 metri. Maahan asennettuna ensiökäämi näyttää laatalta tien pinnassa ja on hyvin huomaamaton elementti osana katuinfrastruktuuria. Induktiolataus on nopea latausmenetelmä, jossa käytettävä latausteho on korkeintaan 200 kW. (VTT 2013)

Induktiolatauslaitteet ovat virroitinlatauslaitteiden tavoin suljettuja järjestelmiä, eikä induktiolatausstandardeja ole olemassa. Näin ollen induktiolatauslaitteita koskevat samat yhteensopivuusongelmat ja riskit kuin virroitinlatauslaitteitakin. Induktiolatauslaitteiden lisäriskinä virroitinlatauslaitteisiin verrattuna on niiden toimintaepävarmuus. Induktiolatauksen toiminta on hyvin pikkutarkkaa ja pienetkin häirttekijät voivat estää latauksen onnistumisen. Tällaisia häirttekijöitä voivat olla esimerkiksi puiden lehdet, hiekka, roskat, lumi ja jää. Lisäksi sähköbussin asemointi induktiolatauslaitteelle vaatii sähköbussin automaattista havaitsemisjärjestelmää. (Samu Kukkonen & Veikko Karvonen 2014; VTT 2013)

Induktiolatauslaitteet ovat hienoja ja todella kalliita järjestelmiä. Ne vaativat toimintaan hyviä käyttöolosuhteita, eivätkä ne ole yhteensopivia muiden laitevalmistajien tuotteiden kanssa. Induktiolatauslaitteiden valmistajia ovat esimerkiksi Bombardier ja Conductix. (Samu Kukkonen & Veikko Karvonen 2014; VTT 2013)

4.3.4. Akunvaihtojärjestelmä

Akunvaihtojärjestelmä on latausmenetelmä, jota asiantuntijat eivät ole tutkineet. Se on muista latausmenetelmistä poikkeava latausratkaisu. Akunvaihtojärjestelmän käyttöä varten joukkoliikennelinjan varrella tulisi sijaita niin sanottu akkujen vaihto- ja latauspiste. Kyseiselle vaihto- ja latauspisteelle saavuttaessa sähköbussin akut irrotettaisiin, vaihdettaisiin uusiin ladattuihin akkuihin ja irrotetut akut laitettaisiin latautumaan. Sama konsepti toistuisi säännöllisin väliajoin kierrosta toiseen.

Akunvaihtojärjestelmän avulla voitaisiin taata sähköbussin akuille optimaaliset latausolosuhteet ja muuttumaton latausaika. Myös vaihto- ja latauspisteen rakentaminen on teoriassa mahdollista joukkoliikennelinjojen säännöllisen reitin ansiosta. Asiantuntijat kuitenkin epäilevät akkujen jatkuvasta vaihtamisesta aiheutuvan vaurioita sähköteknologialle. Lisäksi akkujen nopea, turvallinen ja automaattinen vaihtaminen herättää epäilyksiä.

4.4 Käyttökonseptit

4.4.1. Varikkolataus

Varikkolatauksella tarkoitetaan pienitehoista latausta varikolla. Varikkolataus voidaan suorittaa yön aikana tai päivällä sähköbussin käyttötaukojen aikana. Varikkolatauksen periaate on, että sähköbussia ladataan varikolla useampi tunti kerralla, jonka jälkeen sähköbussi liikennöi ilman latauksia niin kauan, että se viedään taas varikolle latautumaan. Varikkolataus voidaan suorittaa käyttäen kaapeli-, virroitin- tai induktiolatausta, mutta varikkolatauksen pienen tehontarpeen vuoksi kaapelilataus on yleensä riittävä. (VTT 2013)

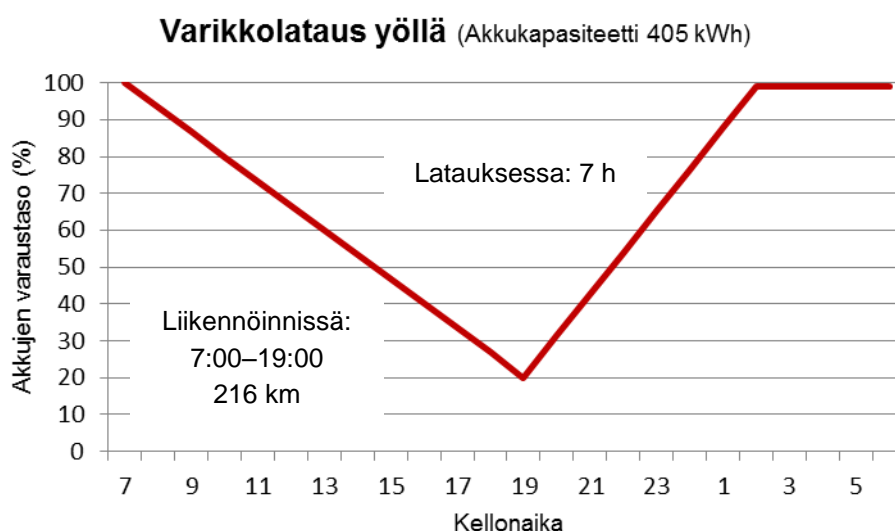
Varikkolatausta käytettäessä ongelmallisia tekijöitä ovat suuri akkukapasiteetti ja pitkä latausaika. Varikkolatauksen etuina ovat pienet investointikustannukset latausinfrastruktuuriin ja järjestelmän helppo ja nopea käyttöönotettavuus. Negatiivisen puolen muodostavat kuitenkin sähköbussikaluston korkea hankinta- ja liikennöintikustannus. Kaluston korkea hankintakustannus johtuu käyttökonseptin vaatimasta suuresta akkukapasiteetista. Yhden kilowattitunnin akkukapasiteetti maksaa noin 1000 euroa. Korkea liikennöintikustannus johtuu akkujen lyhyestä eliniästä. Kyseisessä käyttökonseptissa akkujen elinikää lyhentää erityisesti akkujen käyttö lähes niiden maksimikapasiteetin rajoissa. Varikkolatausta ei suositella pitkäaikaisena sähköbussien käyttökonseptina, mutta se on mahdollinen sähköbussien kokeiluvaiheessa. (VTT 2013)

Suuri akkukapasiteetti mahdollistaa sähköbussin järkevän liikennöintiajan ja päivittäisen operointisäteen. Osa akkukapasiteetin tarpeesta muodostuu sähköbussin sähkönkulutuksesta, mutta osa akkukapasiteetista on niin sanottua käyttämätöntä kapasiteettia, jota tarvitaan akkujen varaustason liiallisen laskemisen ehkäisemiseen. Akkukapasiteettia ei voida kuluttaa ikinä täysin nolliin, vaan sähköbussin akkukapasiteetista on suositeltavaa käyttää korkeintaan 80 %. Akkujen käyttö lähes niiden maksimikapasiteetin rajoissa lyhentää kuitenkin akkujen elinikää olennaisesti ja tämän ehkäisemiseksi akkujen varaustaso on hyvä pitää keskimäärin 30–80 % välillä. (Samu Kukkonen & Veikko Karvonen 2014; Tuomas Humalajoki 2014)

Varikkolatauksessa käytetään maltillisia lataustehoja ja tämän vuoksi latausaika muodostuu pitkäksi. Kaapelilatausta käytettäessä varikkolatausteho on tällä hetkellä korkeintaan 90 kW, jolloin tunnin lataus mahdollistaa korkeintaan 60 km liikennöinnin. Latausaikoja voidaan kuitenkin lyhentää lataustehoa suurentamalla. Virroitin- tai induktiolatausta käytettäessä huomattavasti suuremmatkin lataustehot ovat mahdollisia. Varikkolatauksen periaatteena on kuitenkin pienitehoinen lataus, minkä takia varikkolataustehot pidetään yleensä maltillisina (< 100 kW). Tämän vuoksi kaapelilataus on yleensä riittävä. (Batteriebus Wien 2014; Samu Kukkonen & Veikko Karvonen 2014; Siemens 2014)

Kuvissa 9 ja 10 on esitetty kaksi mahdollista vaihtoehtoa varikkolatausta hyödyntäville sähköbussioperoinnille. Vaihtoehtoissa on käytetty sähköbussin sähkönkulutukse-

na 1,5 kWh/km ja linjanopeutena 18 km/h. Näin ollen sähkönkulutus molemmissa vaihtoehtoissa on 27 kWh/h. Latausteho on korkeintaan 50 kW. Kuvassa 9 on esitetty vaihtoehto, jossa sähköbussi liikennöi koko päivän käyttäen 80 % sähköbussin akkukapasiteetista. Tässä vaihtoehdossa lataus suoritetaan yöllä. Kuvassa 10 on esitetty vaihtoehto, jossa sähköbussi liikennöi vain ruuhkatunteina ja käy varikolla latautumassa päivällä sekä yöllä. Tässä vaihtoehdossa sähköbussin akkujen varaustaso pysyy koko ajan 30–80 prosentin välillä.



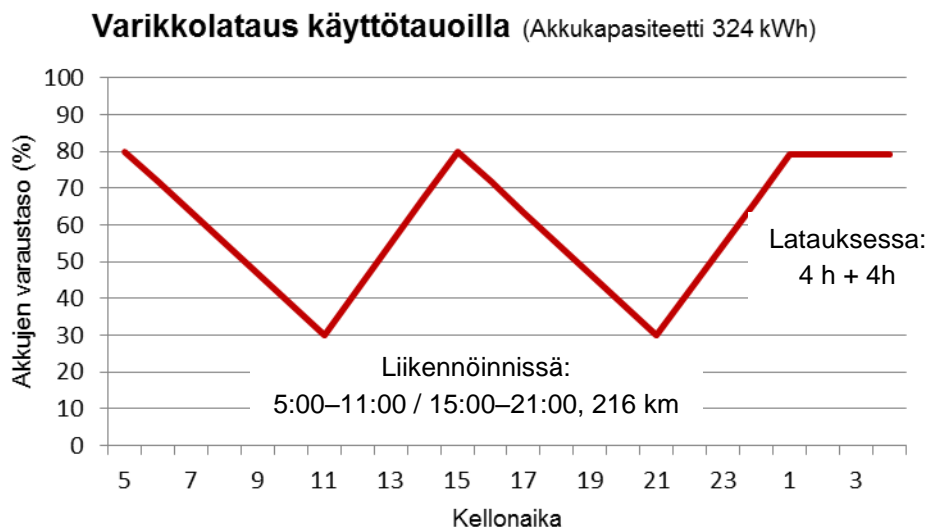
Kuva 9 Sähköbussioperointi käyttäen varikkolatausta yöllä.

Kuvassa 9 esitetyssä vaihtoehdossa ei ole mitään erityisen hyviä puolia, mutta vaihtoehdon parhaita puolia ovat suhteellisen pitkä operointiaika (12 h) ja päivittäinen operointisäde (216 km). Operointisäteenä 216 km on kuitenkin hyvin rajallinen ja mahdollistaa operoinnin vain muutamilla Turun kaupungin sisäisillä vakiolinjoilla. Hyvänä puolena voidaan kuitenkin pitää vaihtoehdon mahdollistamaa 12 tunnin yhtäjaksoista liikennöintiä ilman käyttötaukoja. Huonoja puolia ovat suuren akkukapasiteetin (405 kWh) aiheuttamat suuret kaluston hankintakustannukset sekä operointitavan aiheuttama akkujen eliniän olennainen lyheneminen, mikä nostaa sähköbussin liikennöintikustannuksia merkittävästi. Suuri akkukapasiteetti rajoittaa myös matkustajakapasiteettia.

Vaihtoehtoa ei ole todellisuudessa järkevä toteuttaa kuvassa 9 esitetyllä tavalla. Järkevän operoinnin mahdollistamiseksi akkukapasiteetin tarvetta tulee pienentää ja akkujen käyttöä niiden maksimikapasiteetin rajoissa tulee rajoittaa. Akkukapasiteetin pienentäminen onnistuu operointisädettä tai sähkönkulutusta pienentämällä tai lataustaajuutta suurentamalla. Liikennöintiä akun maksimikapasiteetin rajoissa pystytään rajoittamaan samoin toimenpitein.

Operointisäteen pienentäminen ei ole vaihtoehto, koska päivittäisenä operointisäteenä 216 kilometriäkin on hyvin rajallinen. Sähkönkulutukseen voidaan vaikuttaa kalustovalinnalla ja kuljettajan ajotavalla. Sähkönkulutusta pienentämällä sähköbussin akkukapasiteetin tarvetta voidaan pienentää huomattavasti. Sähkönkulutuksen pienentäminen

1,5 kWh/km → 1 kWh/km pienentää akkukapasiteetin tarvetta kyseisen vaihtoehdon osalta 405 kWh → 270 kWh. Lataustaajuuden suurentaminen johtaa sähköbussioperointiin, jossa käytetään varikkolatausta käyttötauoilla. Kyseinen konsepti on esitetty kuvassa 10.



Kuva 10 Sähköbussioperointi käyttäen varikkolatausta käyttötauoilla.

Kuvassa 10 esitetyssä vaihtoehdossa käytetään suurempaa lataustaajuutta kuin kuvassa 9 esitetyssä vaihtoehdossa, mutta operointiaika (12 h) ja päivittäinen operointisäde (216 km) pysyvät täysin samoina. Suurempi lataustaajuus mahdollistaa pienemmän akkukapasiteetin (324 kWh) ja liikennöinnin niin, että akkujen varaustaso pysyy koko ajan 30–80 prosentin välillä. Tämä laskee sekä sähköbussin hankinta- että liikennöintikustannuksia. Kuvassa 10 esitetyssä vaihtoehdossa huonoja puolia ovat käyttökonseptin aiheuttama pakollinen käyttötauo (4 h) keskellä työpäivää sekä rajallinen operointisäde. Lisäksi akkukapasiteettia tulisi sähköbussin hankintakustannusten minimoimiseksi pienentää edelleen.

Käyttökonseptin aiheuttamaa pakollista käyttötaukoa voidaan lyhentää lataustehoa kasvattamalla. Lataustehon kasvattaminen 50 kW → 60 kW lyhentää latausaikaa 3 tuntiin. Tällöin sähköbussi on pois käytöstä vain 11:00–14:00 välillä ja iltapäivän liikennöinti voidaan aloittaa jo klo 14:00. Näin sähköbussi pystyy palvelemaan kattavasti sekä aamu- että iltaruuhkatunnit ja on pois liikennöinnistä vain keskipäivän hiljaisena aikana. Haluttaessa lataustehoa voidaan kasvattaa edelleen valitun latausmenetelmän mahdollistamissa rajoissa.

Rajallista operointisädettä saadaan kasvatettua sähkönkulutusta pienentämällä tai lataustaajuutta kasvattamalla. Sähköbussin akkukapasiteettia voidaan pienentää samoin toimenpitein. Sähkönkulutuksen pienentäminen 1,5 kWh/km → 1 kWh/km pienentää akkukapasiteetin tarvetta kyseisen vaihtoehdon osalta 324 kWh → 216 kWh. Varikkolatausta käytettäessä lataustaajuutta ei voida rajattomasti kasvattaa aiheuttamatta suuria ongelmia sähköbussiliikennöinnille. Yli kolmen käyttötauon edellyttämä käyttökonsepti

alkaa olla jo mahdoton toteuttaa järkevästi varikkolatausta käytettäessä. Lataustaaajuuden kasvattaminen vaatii siis siirtymistä varikkolatauksen käytöstä pikalatauksen käyttöön. Pikalataus on esitetty luvussa 4.4.2.

4.4.2. Pikalataus

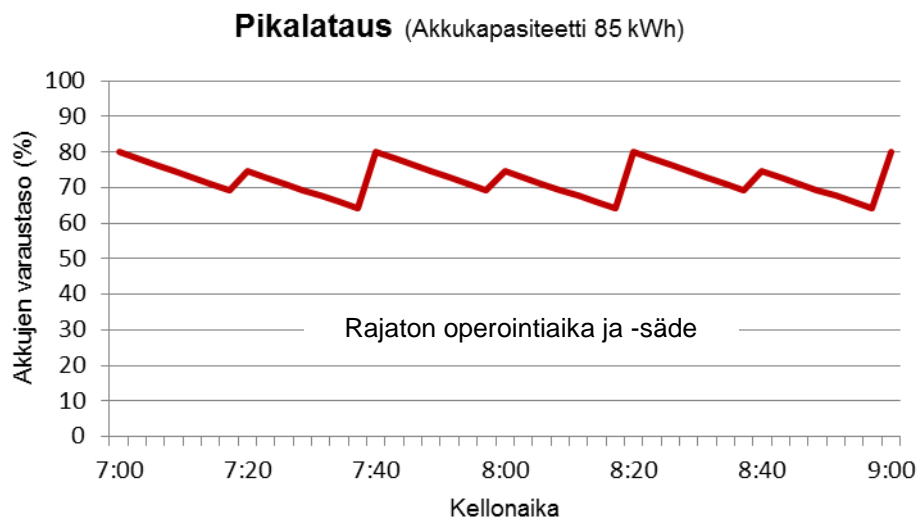
Pikalatauksella tarkoitetaan suuritehoista ja automaattista latausta operoinnin aikana. Lataus suoritetaan säännöllisin väliajoin bussipysäkeillä ja/tai kääntöpaikoilla. Pikalatauksen tavoitteena on minimoida tarvittava akkukapasiteetti ja pitää akkujen varaustaso mahdollisimman tasaisena. Pikalataus voidaan suorittaa käyttäen virroitin- tai induktiolatausta. Pikalatauskonsepti voidaan toteuttaa laajana järjestelmänä, jossa sähköbussikaluston määrä on riittävä korkeiden latausinfrastruktuurikustannusten takaisinmaksun kannalta (VTT 2013).

Pikalatauksen hyvänä puolena on suuri latausteho (100–400 kW), joka mahdollistaa latauksen operoinnin aikana ilman käyttötauvoja. Suurta lataustehoa käytettäessä latausaika voidaan minimoida ja lataus voidaan suorittaa sujuvasti osana normaalia bussiliikennöintiä. Toinen pikalatauksen hyvä puoli on suuri lataustaaajuus, mikä mahdollistaa pienen akkukapasiteetin sekä matalat purku-lataussyklit eli akkujen varaustason pysymisen mahdollisimman tasaisena.

Pienen akkukapasiteetin ansiosta sähköbussin hankintakustannukset pysyvät kohtuullisina. Pikalatauskonseptia käytettäessä akkukapasiteetin tarve on huomattavasti pienempi kuin varikkolatauskonseptissa. Sähköbussin hintaa nostaa kuitenkin suuren lataustehon vaatima kallis akkuteknologia. Akkujen säännöllinen lataaminen ja varaustason pysyminen tasaisena pidentää akkujen elinikää ja mahdollistaa sähköbussin pienet liikennöintikustannukset. (VTT 2013)

Pikalatauskonseptin huonona puolena on kuitenkin suuret latausinfrastruktuurin hankintakustannukset. Pikalatauskonseptin käyttö edellyttää suurta lataustaaajuutta ja näin ollen myös suuria investointeja pysäkkien ja kääntöpaikkojen latausinfrastruktuuriin. (VTT 2013) Latausinfrastruktuurin hankintakustannuksia voidaan kuitenkin hillitä latausaikoja pidentämällä ja lataustaaajuutta pienentämällä. Tämä johtaa kuitenkin nopeasti akkukapasiteetin suurempaan tarpeeseen. Suurempi akkukapasiteetin tarve lisää sähköbussin hankintakustannuksia ja latausaikojen pidentyminen asettaa rajoitteita sähköbussiliikennöinnille.

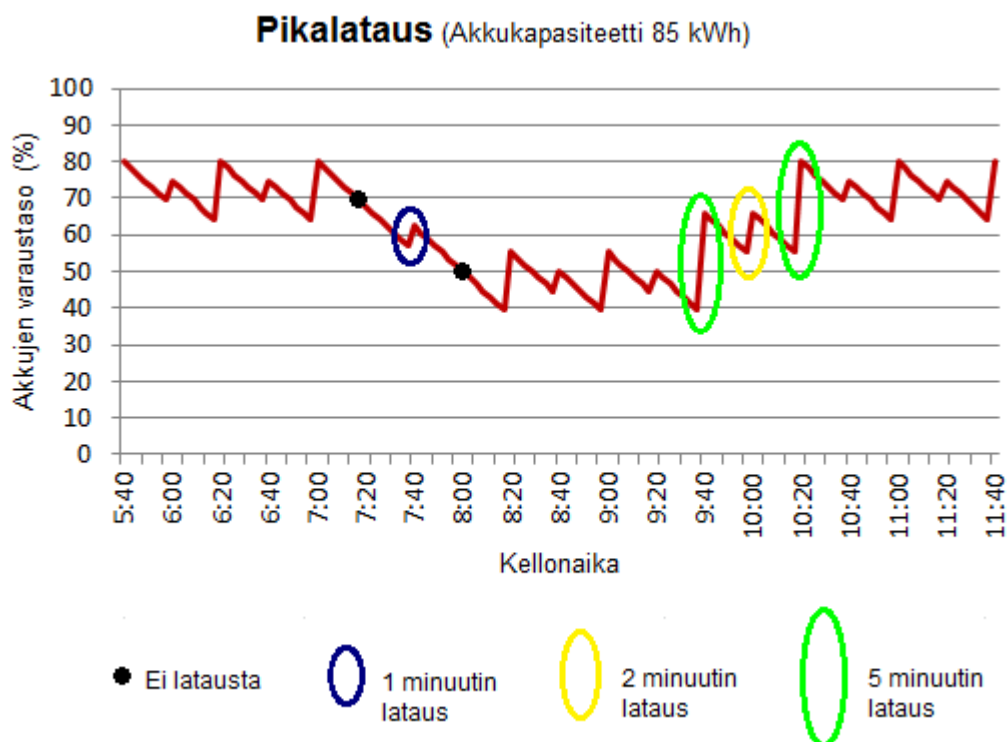
Kuvassa 11 on esitetty yksi mahdollinen vaihtoehto pikalatausta hyödyntävälle sähköbussioperoinnille. Vaihtoehdossa on käytetty sähköbussin sähkönkulutuksena 1,5 kWh/km ja linjanopeutena 18 km/h. Latausteho on 270 kW. Vaihtoehto on teoreettinen esimerkki 12 kilometriä pitkän heilurilinjan pikalatauskonseptista. Latauspisteitä on kolme ja ne sijaitsevat 6 km välein heilurilinjan kääntöpaikoilla sekä Kauppatorilla. Kauppatorilla latausaika on 1 minuutti ja molemmilla kääntöpaikoilla 3 minuuttia.



Kuva 11 Sähköbussioperointi käyttäen pikalatausta.

Kuvassa 11 esitetyssä vaihtoehdossa sekä lataustaajuus että latausteho ovat maltillisia. Latausajan minimoimiseksi ja pysäkkilatauksen mahdollistamiseksi pikalatauksen lataustaajuutta voidaan kasvattaa 1-2 kilometriin ja lataustehoa 400 kW. Tällöin latausaika on vain muutamia kymmeniä sekunteja, mikä mahdollistaa lataamisen sillä aikaa kun ihmiset nousevat bussin kyytiin ja poistuvat kyydistä. Lataustaajuuden kasvattaminen lisää kuitenkin latausinfrastruktuurin hankintakustannuksia. Pikalatauskonseptia käytettäessä akut ladataan 80 prosenttiin saakka, koska tätä suuremman varaustason saavuttaminen hidastaa lataamista ja pidentää latausaikoja.

Kuvassa 11 esitetyssä vaihtoehdossa hyviä puolia ovat akkujen varaustason pysyminen koko ajan tasaisena, pieni akkukapasiteetti (85 kWh) ja rajaton operointisäde. Akkukapasiteetissa on myös hyvin pelivaraa, jolloin latausaikojen lyhentyminen tai latausten välistä jääminen ei tee mahdottomaksi sähköbussioperointia. Todellisuudessa latausajat eivät ole aina yhtä pitkiä, vaan voivat olla lyhyempiä ruuhka-aikaan ja toisaalta taas pidempiä liikenteen hiljaiseen aikaan. Tämä ilmiö on esitetty kuvassa 12. Pikalatauskonseptin huonona puolena ovat pikalatauspisteiden investoinneista aiheutuvat suuret kustannukset.



Kuva 12 Esimerkki pikalatauskonseptin toteutumisesta käytännössä.

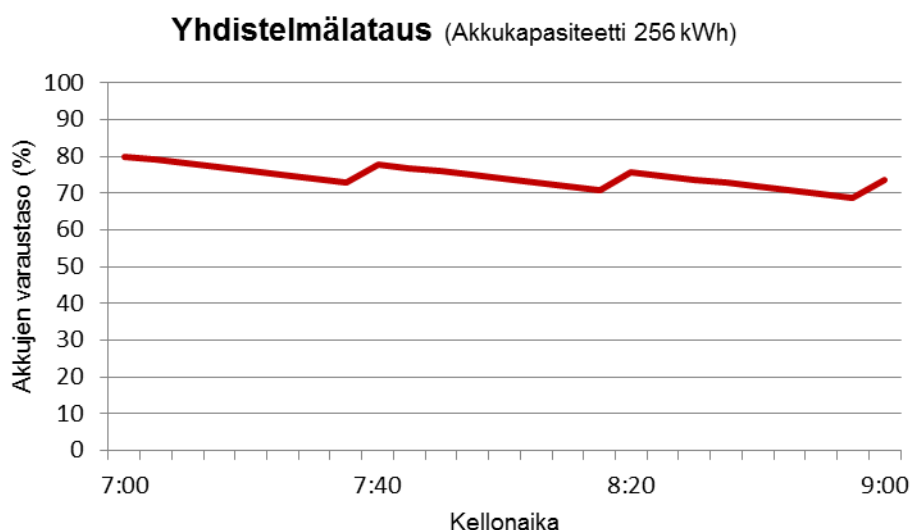
Todellisuudessa latausajat latauspisteillä eivät ole aina yhtä pitkiä. Ruuhka-aikaan latauksia voi jäädä välistä tai ne voivat lyhentyä, kun taas hiljaiseen aikaan pidemmätkin latausajat voivat olla mahdollisia. Kuvassa 12 esitetyssä esimerkissä klo 7:00–8:20 välillä joukkoliikenne on ruuhkautunut ja jäänyt aikataulusta jälkeen. Tämän seurauksena kaksi Kauppatorilla tapahtuvaa minuutin latausta on jäänyt välistä ja yksi kääntöpaikkalataus on lyhentynyt 3 minuutista 1 minuuttiin. Klo 8:20–9:40 sähköbussi on edennyt normaalin lataussuunnitelman mukaisesti. Klo 9:40–10:20 sähköbussin liikennöinti on nopeutunut ja bussi on ehtinyt latautumaan kääntöpaikoilla 5 minuuttia ja Kauppatorilla 2 minuuttia. Klo 10:20 sähköbussi on palannut normaaliin lataussuunnitelmaan.

4.4.3. Yhdistelmä lataus

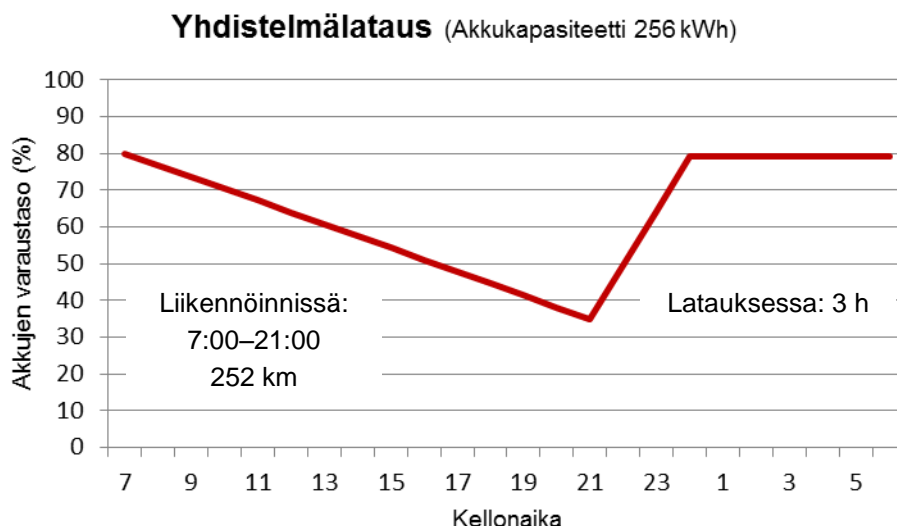
Yhdistelmä latauksella tarkoitetaan käyttökonseptia, jossa sähköbussit ladataan osittain pikalatauksena operoinnin aikana ja osittain varikolatauksena bussin käyttötaukojen aikana. Yhdistelmä latauksella pyritään saavuttamaan sekä varikkolatauksen että pikalatauksen hyvät puolet. Yhdistelmä latauskonseptia käytettäessä voidaan saavuttaa pieni akkukapasiteetti, pitkä operointisäde, kohtuullinen lataustaajuus sekä liikennöinti niin, että akkujen varaustaso pysyy koko ajan 30–80 prosentin välillä. Nämä tekijät mahdollistavat kohtuulliset sähköbussin ja latausinfrastruktuurin hankintakustannukset sekä pienet liikennöintikustannukset.

Yhdistelmälataus voidaan suorittaa käyttäen kaapeli-, virroitin- tai induktiolatausta. Latausmenetelmä valitaan halutun lataustehon perusteella. Kaapelilatausta voidaan käyttää pienitehoisessa latauksessa varikolla ja virroitin- ja induktiolatausta pikalatauksessa operoinnin aikana. Yhdistelmälatauskonseptin lataustehot operoinnin aikana ovat 100 kW-400 kW. Varikkolatausteho on alle 100 kW. Yhdistelmälatauskonseptin tarkoituksena on kuitenkin minimoida latausinfrastruktuurin hankintakustannukset, jolloin lataustehojen pitäminen maltillisina on suotavaa.

Kuvissa 13 ja 14 on esitetty yksi mahdollinen vaihtoehto yhdistelmälatausta hyödyntävällä sähköbussioperoinnille. Kuvassa 13 on esitetty tarkka kuvaus akkujen varaustason laskusta operoinnin aikana ja kuvassa 14 kokonaiskuva varaustason vaihtelusta vuorokauden aikana. Vaihtoehdossa on käytetty sähköbussin sähkönkulutuksena 1,5 kWh/km ja linjanopeutena 18 km/h. Latausteho operoinnin aikana on 150 kW ja varikkolatauksessa korkeintaan 50 kW. Esimerkkinä on käytetty 12 km pitkää heilurilinjaa. Heilurilinjalla on 2 pikalatauspistettä ja varikolla on yksi kaapelilatauspiste. Pikalatauspisteet sijaitsevat heilurilinjan kääntöpaikoilla, jolloin lataustaajuus on 12 km. Latausaika molemmilla kääntöpaikoilla on 5 minuuttia.



Kuva 13 Sähköbussioperointi käyttäen yhdistelmälatausta. Tarkka kuvaus akkujen varaustason laskusta operoinnin aikana.



Kuva 14 Sähköbussioperointi käyttäen yhdistelmä latausta. Kokonaiskuva akkujen varaustason vaihtelusta vuorokauden aikana.

Kuvissa 13 ja 14 esitetyssä vaihtoehdossa hyviä puolia ovat varaustason pysyminen koko ajan 30–80 prosentin välillä, maltillinen pikalatausteho ja pieni varikkolatausteho sekä kohtuullinen lataustaajuus. Akkukapasiteetti (256 kWh) on huomattavasti pienempi kuin varikkolatauskonseptissa (405 kWh), mutta edelleen suuri. Lähitulevaisuudessa tavoitellaan sähköbussioperointia 40–60 kWh akkukapasiteetilla. Päivittäinen operointiaika (14 h) ja operointisäde (252 km) ovat hieman kasvaneet verrattuna varikkolatauskonseptiin, mutta operointiajan ja – säteen kasvattaminen edelleen on tarpeen.

Akkukapasiteettia saadaan haluttaessa pienennettyä latausaikaa, lataustaajuutta tai pikalataustehoa kasvattamalla. Latausajan kasvattaminen 6–7 minuuttiin on mahdollista muutamilla Turun seudun joukkoliikennelinjoilla, mutta tätä pidemmät latausajat vaativat yleensä muutoksia kalustokiertoon. Lataustaajuuden kasvattaminen tarkoittaa käytännössä lyhyemmän joukkoliikennelinjan valitsemista tai siirtymistä pikalatauskonseptiin käyttöön. Pikalataustehoa voidaan kasvattaa 400 kW saakka. Operointisäteen kasvattaminen onnistuu samoin toimenpitein. Lisäksi operointisädettä voidaan kasvattaa akkukapasiteettia suurentamalla. Akkukapasiteetin suurentaminen ei kuitenkaan ole järkevä vaihtoehto mahdollisimman pientä akkukapasiteettia tavoiteltaessa.

Taulukossa 8 on vertailtu variaatioiden avulla eri muuttujien vaikutusta sähköbussiliikennöintiin yhdistelmä latauskonseptia käytettäessä. Latausaika, lataustaajuus ja pikalatausteho ovat vertailussa muuttujia. Vertailun lähtökohtana pidetään kuvassa 14 esitettyä vaihtoehtoa. Taulukossa 8 esitettyyn vertailuun on koottu vain muutamia mahdollisia yhdistelmä latauskonseptin variaatioita. Variaatioiden tarkoituksena on antaa kuva siitä, miten muuttujien muutos vaikuttaa sähköbussiliikennöintiin. Todellisuudessa variaatioita on loputtomasti ja yhdistelmä latauskonsepti tulee aina suunnitella linjakohtaisesti.

Vertailussa on mukana 10 variaatiota. Variaatioissa 1 ja 2 latausaikaa on pidennetty, variaatioissa 3-5 pikalataustehoa on kasvatettu, variaatioissa 6 ja 7 lataustaajuutta on kasvatettu ja variaatioissa 8-10 lataustaajuutta on pienennetty. Kaikissa variaatioissa on käytetty sähköbussin sähkönkulutuksena 1,5 kWh/km. Lisäksi akkukapasiteetista on käytetty jokaisessa variaatiossa 50 % niin, että akkujen varaustaso on pysynyt koko ajan 30–80 prosentin välillä. Variaatioiden 6-10 poikkeavat linjanopeudet johtuvat siitä, että linjanopeuksissa on huomioitu liikennöintiympäristön mahdollistama ajonopeus sekä mahdollisuus vakioaikataulun suunnitteluun. Linjanopeuteen on tässä vertailussa huomioitu myös lataukseen kuluva aika. Todelliset ajonopeudet ovat siis taulukossa esitetyjä nopeuksia suurempia.

Taulukko 8 Yhdistelmä latauskonseptin kymmenessä variaatiossa tapahtuvat muutokset verrattuna kuvassa 14 esitettyyn vaihtoehtoon.

Muuttuja	Kuva 14	Var. 1	Var. 2	Var. 3	Var. 4	Var. 5	Var. 6	Var. 7	Var. 8	Var. 9	Var. 10
Akkukapasiteetti	256 kWh	192 kWh	62 kWh	214 kWh	84 kWh	62 kWh	77 kWh	77 kWh	490 kWh	83 kWh	83 kWh
Linjanopeus	18 km/h	18 km/h	18 km/h	18 km/h	18 km/h	18 km/h	16 km/h	16 km/h	20 km/h	20 km/h	20 km/h
Operointisäde	252 km	324 km	324 km	324 km	324 km	324 km	288 km	288 km	280 km	360 km	360 km
Operointiaika	14 h	18 h	18 h	18 h	18 h	18 h	18 h	18 h	14 h	18 h	18 h
Latausaika operoinnin aikana	5 min	6 min	7 min	5 min	5 min	3 min	5 min	4,5 min	5 min	5 min	10,5 min
Lataustaajuus	12 km	12 km	12 km	12 km	12 km	12 km	8 km	8 km	18 km	18 km	18 km
Pikalatausteho	150 kW	150 kW	150 kW	175 kW	205 kW	350 kW	135 kW	150 kW	150 kW	315 kW	150 kW
Latausaika varikolla	3 h	2 h	1 h	3 h	1 h	1 h	1 h	1 h	5 h	1 h	1 h

	Muuttuja, jonka arvoa on muutettu.
	Akkukapasiteetti < 100 kWh Operointiaika 18 h Latausaika operoinnin aikana < 5 min Pikalatausteho < 150 kW
	Muuttuja, jonka arvo on huonontunut muutoksen seurauksena.

Taulukossa 8 esitetyn vertailun perusteella lataustaajuuden kasvattaminen on paras keino operointisäteen kasvattamiseen ja akkukapasiteetin pienentämiseen. Lataustaajuuden kasvattaminen 4 kilometrillä mahdollistaa 18 h päivittäisen operointiajan ja laskee akkukapasiteetin tarvetta 180 kilowattitunnilla. Lisäksi lataustaajuuden kasvattaminen mahdollistaa pienemmän pikalataustehon käytön ja lyhyemmän latausajan. Vertailun perusteella pienet muutokset latausajassa tai lataustehossa eivät mahdollista sähköbussioperointia pienellä akkukapasiteetilla päivittäisen operointiajan ollessa 18 h. Suuremmilla muutoksilla vaikutukset akkukapasiteettiin ovat merkittäviä. Latausajan pidentäminen 2 minuutilla tai pikalataustehon kasvattaminen noin 50 kilowatilla mahdollistaa 18 h päivittäisen operointiajan ja laskee akkukapasiteetin tarvetta 170–195 kilowattitunnilla.

Vertailun perusteella lataustaajuuden pienentäminen vaikuttaa negatiivisesti sähköbussiliikennöintiin ja lisää huomattavasti akkukapasiteetin tarvetta ilman pikalataustehon tai latausajan muutoksia. Lataustaajuuden pienentäminen 6 kilometrillä aiheuttaa lähes 250 kWh akkukapasiteetin lisätarpeen 14 tunnin päivittäisellä operointiajalla. Pieni akkukapasiteetti ja 18 h operointiaika voidaan kuitenkin mahdollistaa myös pienellä lataustaajuudella, mutta se vaatii suuria muutoksia pikalataustehoon ja latausaikaan. Alle 100 kWh akkukapasiteetti ja 18 h operointiaika on mahdollinen 18 km lataustaajuudella pikalataustehon ollessa yli 300 kW tai latausajan ollessa 10,5 minuuttia. Näin pitkä latausaika on kuitenkin mahdoton toteuttaa Turun seudun joukkoliikennejärjestelmässä ilman kalustokierron muutoksia.

Vertailun perusteella kaikkein potentiaalisin joukkoliikennelinja sähköbussiliikennöintiin yhdistelmälatauskonseptia käytettäessä on mahdollisimman lyhyt linja, jolloin voidaan mahdollistaa suuri lataustaajuus. Jos halutaan kuitenkin operoida pitkillä linjoilla, on latausaikaa tai pikalataustehoa kasvatettava pienen akkukapasiteetin turvaamiseksi. Latausaikaa kannattaa kasvattaa silloin kun se on mahdollista, mutta kun on tarvetta latausajan lyhentämiseen, niin pikalataustehon kasvattaminen on hyvä vaihtoehto. Pikalataustehon kasvattaminen voi kuitenkin aiheuttaa tarvetta kalliimman akkuteknologian hankintaan ja kasvattaa latausinfrastruktuurin hankintakustannuksia. Lataustehon kasvattaminen nostaa myös sähkön hintaa.

4.5 Markkinoilla oleva kalusto

4.5.1. BYD

BYD yrityksen valmistama K9 sähköbussi on ollut ensimmäinen maailmalla käytössä oleva täysin sähkökäyttöinen bussi. Se on myös maailman ensimmäinen low-entry sähköbussi. Bussissa on automaattinen niaustoiminto sen pysähtyessä. K9 bussit ovat esteettömiä ja bussiin pääsy ja sieltä poistuminen on helppoa. Bussissa on tilavat, esteettömät ja valoisat sisätilat. Istuimet on sijoitettu ajoneuvon molemmille sivuille niin, että bussin sisätiloissa liikkumiseen jää paljon tilaa. (BYD) Kuvassa 15 on esitetty BYD K9 sähköbussin sisätilat ja kuvassa 16 bussin mahdollinen ulkomuoto.



Kuva 15 BYD K9 sähköbussin sisätilat. (BYD)



Kuva 16 BYD K9 sähköbussin mahdollinen ulkomuoto. (BYD)

BYD lupaa sähköbusseilleen jopa 250 km operointisäteen viiden tunnin latauksella. Tämä edellyttää sähköbusseilta yli 300 kWh akkukapasiteettia. BYD käyttää sähköbusien akkuina litiumrautafosfaatti-akkuja (LiFePO_4), joille he lupaavat 12 vuoden elinikää. BYD kertoo sivuillaan litiumrautafosfaatti-akkujen olevan turvallisia, kustannuksiltaan edullisia, ympäristöystävällisiä ja pitkän eliniän omaavia. Akuilla on korkea energiatiheys, hyvä suorituskyky korkeissa lämpötiloissa ja erinomainen yhdenmukaisuus. Akut ladataan käyttäen kaapelilatausta. (BYD)

BYD K9 sähköbussi saa akkujen syöttämän energian lisäksi energiaa myös sähköbussin katolla sijaitsevilta aurinkopaneeleilta. Aurinkopaneelit lataavat sähköbussin akkuja jatkuvasti ajon aikana. K9 sähköbussit on myös varustettu ajotietokoneella, joka tunnistaa kuljettajan. Ajotietokoneet tekevät esimerkiksi energiankulutuksen seuraamisen erittäin helpoksi. Kuljettajan tunnistusominaisuuden ansiosta kaikki sähköbussin liikennöintiin liittyvät tiedot voidaan profiloida tiettyyn kuljettajaan. (BYD) Taulukossa 9 on esitetty BYD K9 sähköbussin tekniset tiedot.

Taulukko 9 BYD K9 sähköbussin tekniset tiedot. (BYD)

Rungon mitat	12,267 x 2,55 x 3,486 m
Lattian korkeus	265 mm
Kääntösäde	12,781 m
Paino kuormittamattomana	14 000 kg
Sähkönkulutus	1,2-1,6 kWh/km
Matkustajakapasiteetti	40 istumapaikkaa

Sallittu maaston kaltevuus	12 % / 28 %
Akku	LiFePO4
Akkujen kapasiteetti	324 kWh
Latausmenetelmät	kaapelilataus
Latausteho	60 kW (5 h) / 200 kW (1,5 h)

BYD K9 sähköbussseja on testattu esimerkiksi Yhdysvalloissa. Sähköbussseilla ajettiin eripituisia ja luonteisia reittejä useiden kilometrien ajan ja sähkönkulutus vaihteli 1,2–1,6 kWh/km välillä. Sähköbussseille luvataan erinomainen suorituskyky korkeissa lämpötiloissa ja esimerkiksi Kaliforniassa K9 sähköbussilla pystyttiin ajamaan 299 kilometriä yhdellä latauksella. BYD K9 sähköbussseja on ollut syksystä 2010 asti liikennöinnissä Kiinassa. Ensimmäinen kokeilu sähköbussseilla liikennöinnistä pohjoismaissa aloitettiin keväällä 2014 Espoon kaupungissa osana kansallista eBus-hanketta. Käytettävästä sähkömoottorista riippuen K9 sähköbussit pystyvät liikennöimään maaston kaltevuuden ollessa jopa 28 %. (BYD)

4.5.2. Caetano Bus

Caetano Bus yrityksellä on markkinoilla yksi kaupunkiliikennöintiin tarkoitettu sähköbussimalli Cobus 2500 EL. Cobus 2500 EL on 12-metrinen matalalattiainen sähköbussi. Sähköbussia ei ole suunniteltu säännölliseen pikalataukseen, vaan lataus suoritetaan kaapelilatauksena yöllä tai bussin käyttötauoilla. Akkuina käytetään litiumrautafosfaattiakkuja, jotka on sijoitettu bussin takaosaan ja sivuille. Sähköbussissa käytettävä akkukapasiteetti mahdollistaa 120 km operointisäteen yhdellä latauksella. Cobus 2500 EL sähköbussissa on sisätilan lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmä. (Caetano Bus / Efacec 2013) Taulukossa 10 on esitetty Cobus 2500 EL sähköbussin tekniset tiedot ja kuvassa 17 sähköbussin mahdollinen ulkomuoto.

Taulukko 10 Cobus 2500 EL sähköbussin tekniset tiedot. (Caetano Bus / Efacec 2013; Cobus 2500 EL)

Rungon mitat	12,3 x 2,55 x 3,085 m
Sähkönkulutus	1,1-1,35 kWh/km
Matkustajakapasiteetti	66 (23 istumapaikkaa)
Akku	LiFePO4
Akkujen kapasiteetti	150 kWh
Latausmenetelmät	kaapelilataus
Latausteho	50 kWh (3 h)



Kuva 17 Cobus 2500 EL sähköbussin mahdollinen ulkomuoto. (Caetano Bus / Efacec 2013)

Cobus 2500 EL sähköbussia on testattu tähän mennessä ainakin Portugalissa ja Saksassa. Testien perusteella sähköbussi kuluttaa kaupunkiolosuhteissa 1,1–1,35 kWh/km kuljettajan ajotavasta riippuen. (Caetano Bus / Efacec 2013) Tämän lisäksi sähköbussi on ollut syksystä 2012 lähtien pitkäaikaisessa kolme vuotta kestävässä kokeilussa Suomessa. Caetano Bus yrityksen sähköbussi aloitti ensimmäisenä sähköbussiliikennöinnin Espoossa linjalla 11 Tapiola-Matinkylä-Friisilänaukio. Liikennöitsijänä toimii Veolia Transport Finland Oy. Sähköbussikokeilu on osa Tekesin johtamaa kansallista eBus-hanketta, jossa ovat mukana muun muassa HSL, Veolia Transport Finland Oy, Fortum Oy, Liikenne- ja viestintäministeriö, Työ- ja elinkeinoministeriö, VTT, Aalto yliopisto, Metropolia Ammattikorkeakoulu ja Espoon kaupunki. (HSL 2012)

Caetano Bus yrityksen sähköbussikokeilu Suomessa ei kuitenkaan sujunut talvena 2012–2013 ongelmitta. Kymmenen pakkasastetta riitti hydyttämään Cobus 2500 EL sähköbussin akut. (Helsingin Sanomat 2013) Tämän vuoksi sähköbussi vietti kesänsä Caetanon tehtaalla testattavana ja korjattavana. Sähköbussi palasi paranneltuna Espooseen elokuussa 2013. (Talouselämä 2013) Paranneltu Cobus 2500 EL sähköbussi pystyy liikennöimään nyt erittäin kylmissä olosuhteissa. Viimeaikaiset parannukset pitävät sähköbussin akut lämpiminä niin ajon kuin latauksenkin aikana. (Ebusco 2014)

4.5.3. Ebusco

Ebusco yrityksellä on tällä hetkellä markkinoilla yksi sähköbussimalli YTP-1. Lisäksi heiltä on tulossa lähitulevaisuudessa markkinoille toinen matalalattiainen sähköbussimalli YTP-2 (YTP-2). Ebusco YTP-1 sähköbussi on 12-metrinen matalalattiabussi, jossa on suuri akkukapasiteetti ja pieni sähkönkulutus. Sähköbussin päivittäinen operointisäde on yli 250 kilometriä yhdellä latauksella. Ebusco YTP-1 sähköbussit (300 kpl) ovat liikennöineet jo yli kahden vuoden ajan Kiinassa ajaen yhteensä 31 miljoonaa kilometriä. Sähköbussimalli on myös voittanut ECW Ecology Label 2013 palkinnon (Ebusco News). (Ebusco Components; Ebusco 2013; YTP-1) Taulukossa 11 on esitetty Ebusco YTP-1 sähköbussin tekniset tiedot.

Taulukko 11 Ebusco YTP-1 sähköbussin tekniset tiedot. (YTP-1)

Bussin pituus	12 m
Sähkönkulutus	0,9 kWh/km
Matkustajakapasiteetti	76 +
Akku	LiFePO4
Akkujen kapasiteetti	242 kWh

Ebusco pystyy toimittamaan kaikki tarvittavat komponentit ja järjestelmät sähköbussin rakentamiseen. Näitä ovat esimerkiksi sähkömoottorit, akkupaketit ja latausjärjestelmät. Ebusco yrityksen toimittamalla latureilla sähköbussien akut voidaan ladata 100 prosenttisesti 2,5 tunnissa. Heidän sähköteknologiansa soveltuu myös dieselbussien muuttamiseen sähköbussiksi. (Ebusco Components; YTP-1) Kuvassa 18 on esitetty Ebusco YTP-1 sähköbussi liikennöimässä Espoossa 4.12.2013.



Kuva 18 Ebusco YTP-1 sähköbussi liikennöimässä Espoossa 4.12.2013. (Ebusco Home)

Ebusco YTP-1 sähköbussi aloitti liikennöinnin Espoossa linjalla 11 Tapiolan ja Friisilän välillä joulukuussa 2013. Ebuscon kolmevuotinen kokeilu on osa kansallista eBus-hanketta, jossa tutkitaan sähköbussien soveltuvuutta Suomen haastaviin talviolosuhteisiin. Ebusco on toinen Espoossa liikennöinnin aloittanut sähköbussi. Ensimmäisenä Espoossa liikennöinnin aloitti Caetano Bus yrityksen valmistama sähköbussi syksyllä 2012. Sähköbussia liikennöivä Veolia Transport Finland Oy on tehnyt historiaa olemalla ensimmäinen liikennöitsijä, joka operoi sähköbusseilla talvella. (Ebusco 2013; Fortum 2014; HSL 2012)

Akkujärjestelmä, jonka Ebusco on kehittänyt kylmiä ajo-olosuhteita varten, on toiminut kaikkia tyydyttävällä tavalla myös pakkasella. Ebusco liikennöi Espoossa 180 km päivässä kuluttaen noin 1 kWh/km (Ebusco Home). Tähän mennessä kaikki on mennyt hyvin ja viimeaikaiset testit Suomessa ovat osoittaneet, että YTP-1 sähköbussi pystyy liikennöimään hyvin myös vaikeissa ja kylmissä olosuhteissa. (Fortum 2014; Ebusco News; YTP-1)

4.5.4. Siemens/Rampini

Siemens/Rampini-sähköbussi on ensimmäinen sarjavalmistainen sähkölinja-auto Euroopassa. Niitä on käytössä Wienin keskustassa normaalissa linjaliikenteessä. Siemens on toimittanut busseihin tarvittavan sähköteknologian ja Rampini on valmistanut bussin rungon. Siemens/Rampini-sähköbussi on malliltaan matalalattiainen Alé Electric (Alé EL). Bussin akkukapasiteetti (180 kWh) ei mahdollista koko päivän liikennöintiä kaupunkiliikenteessä ilman välilatauksia. Ajomatka yhdellä latauksella on 120–150 km. Akkukapasiteetti on sijoitettu sähköbussissa siten, että akkujen paino jakautuu tasaisesti akseleille. Yhdeksästä akusta kolme on sijoitettu ajoneuvon katolle, viisi ajoneuvon takaosaan ja yksi bussin alle. (Alé EL; Siemens; Siemens esite)

Alé Electric sähköbussin rungossa on käytetty korroosionkestäviä materiaaleja ja rungon rakenne antaa hyvän suojan sivulta tulevan törmäyksen varalta. Ajoneuvo on varustettu kuljettajaa palvelevalla ilmastoinnilla sekä matkustajia palvelevalla koneellisella ilmanvaihdolla. Moderni ilmanvaihto ja lämmitysjärjestelmä takaavat raikkaan ilman kesällä sekä lämpimän ilman talvella. Ajoneuvon turvallisuuden varmistavat EBS (Electronically controlled Braking System), ABS (Antilock Braking System), ASR (Anti-Slip Regulation) ja ESC (Electronic Stability control System) sekä järjestelmä, joka pysäyttää ajoneuvon sen ovien avautuessa. (Alé EL; Siemens esite) Kuvassa 19 on esitetty Alé Electric bussin mahdollinen ulkomuoto. Bussin värit ja ovien määrä voi vaihdella tilaajan toiveiden mukaisesti.



Kuva 19 Alé Electric bussin mahdollinen ulkomuoto. (Alé EL)

Siemens pystyy toimittamaan sähköbusseihin kaiken sähköteknologian. Siemensin teknologia sopii kaikkiin bussien alustoihin ja sillä on myös mahdollista muuttaa diesel-

ja kaasubusseja sähköisiksi. Siemensin sähkömoottorit hyödyntävät jopa 90 % sähköenergiasta, polttomoottorien hyötysuhteen ollessa korkeintaan 40 % (diesel). Siemensin teknologialla varustetut sähköbussit ovat myös erittäin käyttäjäystävällisiä. Niiden kiihdytys ja jarrutus ovat esimerkiksi perinteisiä dieselbusseja pehmeämpiä. Siemens yhdistää sähköbussiratkaisuissaan teknologioita raideliikenteestä, sähkön jakelusta ja autoteollisuudesta. (Siemens) Taulukossa 12 on esitetty Siemensin sähköteknologialla varustetun Alé Electric bussin tekniset tiedot.

Taulukko 12 Alé Electric bussin tekniset tiedot. (Alé EL; Batteriebus Wien 2014; Siemens esite)

Rungon mitat	7,72 x 2,2 x 3,05 m
Lattian korkeus	laskettuna 250 mm
Paino kuormittamattomana	11 800 kg
Sähkönkulutus	1,2-2,5 kWh/km
Matkustajakapasiteetti	43 (9 istumapaikkaa)
Akku	LiFePO4
Akkujen kapasiteetti	180 kWh
Latausmenetelmät	kaapelilataus johdinlataus induktio

Alé Electric bussia on tällä hetkellä saatavana vain kahdeksanmetrisenä, mutta tulevaisuudessa bussista on tulossa markkinoille myös 12 metrinen versio. Alé Electric bussissa on mahdollisuus erilaisiin akkupaketteihin. Jos sähköbussilta toivotaan liikennöintiä ilman välilatauksia, niin bussiin sijoitettavien akkujen kapasiteetti on 180 kWh ja ne mahdollistavat liikennöinnin 120–150 km säteellä. Jos bussilla kuitenkin liikennöidään välilatauksin, kuten esimerkiksi Wienissä, voi akkukapasiteetti olla huomattavasti pienempi.

Alé Electric bussi on ollut myös testikäytössä Suomessa. Sähköbussia testattiin Porvoossa ja Turussa heinäkuussa 2013. Porvoossa liikennöitiin kolme viikkoa ilmaisella turistilinjalla kaupungin keskustassa 1.-21.7. Sähköbussi liikennöi noin 3,5 km pituista reittiä yhteen suuntaan vanhan Porvoon Kirkkotorin ja Taidetehtaan välillä. Matkan varrella oli seitsemän pysäkkiä. Turussa sähköbussi oli testikäytössä tavallisessa linjaliikenteessä 23.–28.7. Se liikennöi linjalla 1 Kauppatorin ja Sataman välillä erillisen aikataulun mukaisesti noin 7 km pituista reittiä. (E-move; Siemens)

4.5.5. Solaris Bus & Coach

Solaris Bus & Coach yrityksellä on tällä hetkellä markkinoilla kaksi täysin sähkökäyttöistä bussimallia. Kyseiset sähköbussimallit ovat Urbino 8.9 low-entry electric ja Urbino 12 electric. Solaris on myös tuomassa markkinoille lähitulevaisuudessa 18 metrisen

sähkökäyttöisen nivelbussin (Urbino 18 electric). Urbino 8.9 LE electric bussi on suunniteltu ja rakennettu perustuen Solaris Alpino 8.9 low-entry bussimalliin ja täysin matalalattiainen Urbino 12 electric perustuen Solaris Urbino 12 bussimalliin. Solaris Urbino electric bussit eroavat kuitenkin monelta osin polttomoottorikäyttöisistä bussikollegoistaan. Eroavaisuuksia on esimerkiksi ajoteknologiassa sekä bussien ulkomuodossa ja sisätiloissa. (Solaris 2014 a)

Solaris Bus & Coach yrityksen valmistamien sähköbussien ajoteknologia voidaan sovittaa täysin liikennöitsijän odotuksia vastaavaksi. Tämän mahdollistavat järjestelmän komponenttien joustava suunnittelu, mikä sallii komponenttien valitsemisen ja mitoittamisen sen reitin mukaan, jota bussi tulee liikennöimään. Sähköbussin tulevaan reitti-profiiliin perustuen määritetään liikennöintiin soveltuva ajoteknologia, johon sisältyvät moottorin teho, koko, akkujen kapasiteetti sekä käytettävä latausmenetelmä. Myös ovi-en määrä sekä niiden yksi- tai kaksilehtisyys on joissakin tapauksissa valittavissa. Urbino 8.9 LE electric bussissa on aina yksilehtinen ovi edessä ja kaksilehtinen ovi bussin keskellä, mutta Urbino 12 electric bussiin on mahdollisuus valita 2-3 ovea sekä yksi- tai kaksilehtinen etuovi. (Solaris 2014 a) Kuvassa 20 on esitetty Solaris Urbino 12 electric bussin mahdollinen ulkomuoto.



Kuva 20 Solaris Urbino 12 electric bussin mahdollinen ulkomuoto. (Solaris 2014 c)

Solaris Urbino electric busseissa käytetään Li-ion-akkuja. Akut eivät toimi sähköbussissa pelkästään moottorin energiavarastona, vaan akkujen energiaa käyttävät myös ilmastointi- ja lämmitysjärjestelmä, ohjaustehostin sekä sähkökäyttöiset ovet. Solaris tarjoaa kolme erilaista latausmenetelmää valmistamiinsa sähköbusseihin. Menetelmiä ovat kaapeli-, virroitin- ja induktiolataus. Urbino 8.9 LE electric bussiin on kuitenkin saatavilla latausmenetelmistä vain kaapelilataus. Oikealla sähkömoottorin, akkukapasiteetin ja latausmenetelmän valinnalla sähköbussit kykenevät alhaisimmilla operointikustannuksilla samaan suorituskykyyn dieselbussien kanssa. (Solaris 2014 a)

Solaris Urbino electric bussit on varustettu energiaa säästävillä LED valoilla. LED valoja on käytetty sekä sähköbussin sisätilan valaistuksessa, että ajovaloissa. Kuljettajan kojelauta on varustettu kosketusnäytöllisillä paneeleilla, joiden kautta kuljettajalle välittyy informaatiota esimerkiksi sähköjärjestelmän tilasta ja akkujen varaustasosta. Kosketusnäytöllä varustettujen paneelien kautta kuljettaja voi kontrolloida lämmitysjärjestelmää sekä muita ajoneuvon toimintoja. Tämä helppokäyttöinen järjestelmä tarjoaa

kuljettajalle mahdollisuuden keskittyä pelkästään ajamiseen, ilman ylimääräisiä häiriötekijöitä. Solaris Urbino electric busseissa on myös vakiovarusteina EBS, ABS ja ASR. (Solaris 2014 a) Taulukossa 13 on esitetty sekä yhdeksän että 12 metrisen Solaris Urbino electric bussin tekniset tiedot.

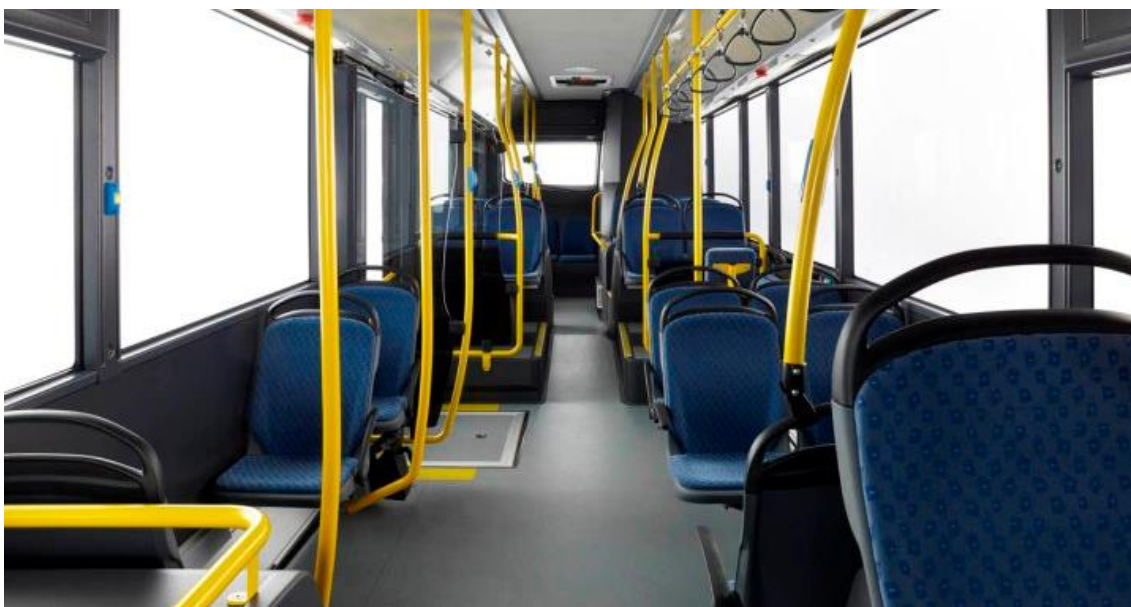
Taulukko 13 *Solaris Urbino electric bussien tekniset tiedot. (Solaris 2014 a; Solaris 2014 b; Solaris 2013)*

	8.9 LE electric	12 electric
Rungon mitat	8,95 x 2,4 x 3,25 m	12 x 2,55 x 3,25 m
Lattian korkeus	laskettuna 250 mm	matalattiabussi
Kääntösäde	16,9 m	21,4 m
Paino kuormittamattomana	8 130-10 400 kg	10 400-13 000 kg
Matkustajakapasiteetti	21-29 istumapaikkaa	23-34 istumapaikkaa
Akku	Li-ion	Li-ion
Latausmenetelmät	kaapelilataus	kaapelilataus johdinlataus induktio

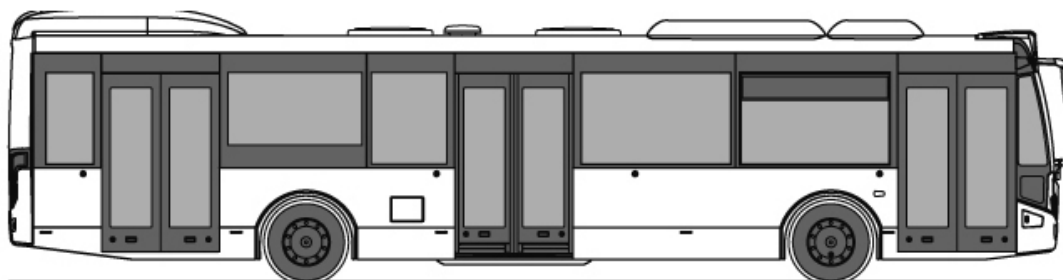
Solaris Bus & Coach yritys ei kerro sivuillaan tarkemmin mitä Li-ion akkua he käyttävät sähköbusseissaan. Akku on kuitenkin todennäköisesti LFP-akku. Sähköbusseissa on mahdollisuus erilaisiin akkupaketteihin ja latausmenetelmiin. Sähköbussin akkukapasiteetti määritetään bussin tulevaan reittiprofiiliin perustuen. Tietoa Solaris Urbino 12 electric bussin lattian korkeudesta ei löytynyt, mutta sen sanottiin olevan täysin matalalattiainen (a fully low-floor). Matkustajakapasiteetin osalta oli ilmoitettu vain istumapaikkojen määrä sähköbussissa.

4.5.6. VDL Bus & Coach

VDL Bus & Coach yrityksellä on markkinoilla yksi täysin sähkökäyttöinen bussi Citea Low Floor Electric (Citea SLF-120 Electric). Bussi on matalalattiainen ja siinä on leveät sisäänkäynti- ja poistumisovet. Bussissa on jalattomat istuimet (free-hanging seats), joiden ansiosta bussin koko lattia on esteetön. Matalan ja esteettömän lattian sekä leveiden ovien ansiosta myös iäkkäät ja liikuntarajoitteiset pystyvät käyttämään Citea Electric bussia ja sen sisätilojen siivoaminen on nopeaa ja helppoa. Isot ikkunat takaavat valoisan sisätilan ja lämmitys- ja ilmastointijärjestelmä huolehtii jatkuvasti miellyttävästä lämpötilasta. Kuvassa 21 on esitetty Citea Electric bussin sisätilat ja kuvassa 22 bussin mahdollinen ulkomuoto. (VDL Citea)



Kuva 21 Citea Low Floor Electric bussin sisätilat. (VDL Citea)



Kuva 22 Citea Low Floor Electric bussin mahdollinen ulkomuoto. (VDL Citea)

Kuvassa 22 Citea Electric bussissa on kaksilehtiset ovet sekä edessä että takana, mutta bussimalliin on tarjolla myös yksilehtisiä ovia. Citea Electric bussissa on moduulirakenne, mikä tekee mahdolliseksi bussin räätälöinnin jokaisen liikennöitsijän tarpeisiin sopivaksi. Bussin kevyen rakenteen ansiosta sen omamassa on pieni, mikä takaa pienen energiankulutuksen. Kuljettajan ajomukavuuden varmistavat tasapainotettu voimansiirto, tunnukas ohjaus, ergonomisesti muotoiltu istuin, mittariston esteetön näkeminen, isot ikkunat ja hyvin sijoitetut peilit. EBS, ABS ja ASR ovat varmistamassa ajoneuvon turvallisuutta kaikissa tilanteissa. (VDL Citea)

Citea Electric bussissa on mahdollisuus erilaisiin akkupaketteihin ja latausmenetelmiin. Bussilla on mahdollisuus operoida pitkää matkaa (100–150 km) ilman välilatauksia, jolloin latausmenetelmänä käytetään kaapelilatausta. Pitkän matkan operoinnin vaatima suuri akkukapasiteetti rajoittaa kuitenkin matkustajien määrää bussissa sekä lisää sähköbussin hankintakustannuksia. Operoitaessa ilman välilatauksia bussin operointimatkaa voidaan pidentää asentamalla niin sanottu range extender, joka mahdollistaa jopa 200 km operointisäteen yhdellä latauksella. Range extenderin energianlähteenä voidaan käyttää polttokennoa, akkua tai dieselgeneraattoria. (VDL Citea; VDL esittely 2014)

Lataaminen on myös mahdollista säännöllisin väliajoin operoinnin aikana, jolloin valittavana on useampia latausmenetelmiä. Valittaessa lataus säännöllisin väliajoin operoinnin aikana akkukapasiteetin tarve pienenee huomattavasti ja mahdollisia latausmenetelmiä ovat kaapeli-, virroitin- ja induktiolataus. Sähköbussin akkuja ladataan tällöin 20–30 km välein. (VDL Citea; VDL esittely 2014) Taulukossa 14 on esitetty Citea Low Floor Electric bussin tekniset tiedot. Bussin paino kuormittamattomana ja matkustajakapasiteetti riippuvat tarvittavan akkukapasiteetin viemästä tilavuudesta ja akkujen aiheuttamasta painosta.

Taulukko 14 Citea Low Floor Electric bussin tekniset tiedot. (VDL Citea; VDL esittely 2014)

Rungon mitat	12 x 2,55 x 3,12 m
Kääntösäde	21,176 m
Paino kuormittamattomana	+/- 10 600 kg
Matkustajakapasiteetti	+/- 100
Akku	LiFeMgPO4
Akkujen kapasiteetti	84 kWh
Latausmenetelmät	kaapelilataus johdinlataus induktio

VDL Citea Electric bussista on tällä hetkellä saatavissa vain 12 metrinen malli, mutta tulevaisuudessa markkinoille on tulossa myös 18 metrinen sähköbussi. VDL Bus & Coach ei ole tehnyt vielä lopullista päätöstä akkutoimittajasta, mutta bussin demoversiossa on käytössä litiumrautamagnesiumfosfaatti-akut, joiden kapasiteetti on 84 kWh. Bussi voidaan varustaa myös suuremmalla akkukapasiteetilla. Citea Electric bussi ei ole vielä käytössä normaalissa linjaliikenteessä, mutta se on mukana Espoon kaupungin sähköbussipilotissa osana kansallista eBus-hanketta. Ensimmäinen VDL Citea Electric bussi alkoi liikennöidä Espoossa keväällä 2014. Liikennöitsijänä toimii Veolia Transport Finland Oy. (VDL esittely 2014)

Tällä hetkellä VDL Bus & Coach yrityksen valmistamaa Citea bussimallia on käytössä Suomessa ainakin Pohjolan liikenteellä ja Koiviston autolla. Joulukuussa 2013 ensimmäiset Euro 6 Citeat toimitettiin Pohjolan liikenteelle ja kyseiset 29 ajoneuvoa aloittivat liikennöinnin Helsingin kaupunkiliikenteessä tammikuussa 2014. Seuraavat 10 Pohjolan liikenteen tilaamaa Citea bussia aloittivat liikennöinnin Kuopiossa kesällä 2014. Kevättalvella 2014 Koiviston auto tilasi VDL Bus & Coach yritykseltä peräti 64 Citea bussia käytettäväksi joukkoliikenteessä Kuopion ja Lahden alueilla. Citea bussi-malli on voittanut Bus of The Year kilpailun vuonna 2011. (VDL Citea; VDL News 2014)

4.6 Markkinoilla olevan kaluston vertailu

Taulukkoon 15 on koottu sähköbussien tekniset tiedot kuudelta aktiivisesti sähköbussi-markkinoille pyrkivältä kalustovalmistajalta. Kyseisiä kalustovalmistajia ovat BYD, Caetano Bus, Ebusco, Siemens/Rampini, Solaris Bus & Coach ja VDL Bus & Coach. Kalustovalmistajien sähköbussikalusto on esitetty tarkemmin luvussa 4.5. Taulukkoon 15 on merkattu vihreällä värillä tiedot, jotka ovat eduksi kyseiselle sähköbussivalmistajalle ja punaisella värillä tiedot, jotka eivät näyttäyty eduksen vertailussa.

Taulukko 15 Sähköbussien tekniset tiedot. (Alé EL; Batteriebus Wien 2014; BYD; Caetano Bus / Efacec 2013; Cobus 2500 EL; Siemens esite; Solaris 2014 a; Solaris 2014 b; Solaris 2013; VDL Citea; VDL esittely 2014; YTP-1)

Muuttujat	BYD	Caetano Bus	Ebusco	Siemens/Rampini	Solaris Bus & Coach		VDL Bus & Coach
					8.9 LE electric	12 electric	
Rungon mitat	12,267 x 2,55 x 3,486 m	12,3 x 2,55 x 3,085 m	12 m	7,72 x 2,2 x 3,05 m	8,95 x 2,4 x 3,25 m	12 x 2,55 x 3,25 m	12 x 2,55 x 3,12 m
Lattian korkeus	265 mm	matalalattiabussi	matalalattiabussi	laskettuna 250 mm	laskettuna 250 mm	matalalattiabussi	matalalattiabussi
Paino kuormittamattomana	14 000 kg	ets.	ets.	11 800 kg	8 130-10 400 kg	10 400-13 000 kg	+/- 10 600 kg
Sähkönkulutus	1,2-1,6 kWh/km	1,1-1,35 kWh/km	0,9 kWh/km	1,2-2,5 kWh/km	ets.	ets.	ets.
Matkustajakapasiteetti	40 istumapaikkaa	66 (23 istumapaikkaa)	76 +	43 (9 istumapaikkaa)	21-29 istumapaikkaa	23-34 istumapaikkaa	+/- 100
Akku	LiFePO4	LiFePO4	LiFePO4	LiFePO4	Litium-ioni	Litium-ioni	LiFeMgPO4
Akkujen kapasiteetti	324 kWh	150 kWh	242 kWh	mea.	mea.	mea.	mea.
Latausmenetelmät	kaapelilataus	kaapelilataus	ets.	kaapeli-, virroitin- ja induktiolataus	kaapelilataus	kaapeli-, virroitin- ja induktiolataus	kaapeli-, virroitin- ja induktiolataus

ets. = ei tietoa saatavilla

mea. = mahdollisuus eri akkupaketteihin

BYD yrityksen valmistama sähköbussi on ollut ensimmäinen maailmalla käytössä oleva sähköbussi ja niitä on ollut pitkään liikennöinnissä Kiinassa. Sähköbussissa on vertailun suurin akkukapasiteetti, bussi on painava ja hyvin korkea. Suuri akkukapasiteetti mahdollistaa pienen lataustaajuuden, mutta lisää bussin painoa, korkeutta ja hankintakustannuksia merkittävästi. Sähköbussi soveltuu erinomaisesti käytettäväksi varikolatauskonseptiin, mutta rajoittuneisuus pelkkään kaapelilatausmenetelmään ei mahdollista pienemmän akkukapasiteetin eikä pika- tai yhdistelmälatauskonseptin käyttöä.

BYD yrityksen valmistaman sähköbussin hyviä puolia ovat suuri matkustajakapasiteetti sekä pitkä käyttökokemus Kiinassa. Tietoa kokonaismatkustajakapasiteetista ei ollut saatavilla, mutta istumapaikkojen määrän osalta bussi on selkeästi vertailun paras. BYD yrityksen valmistaman sähköbussin liikennöintimahdollisuuksista Suomen kylmissä olosuhteissa on saatavilla lähitulevaisuudessa tietoa, kun se kokee ensimmäisen talvensa 2014 kansallisessa eBus-hankkeessa.

Suomessakin testattavana ollut Caetano Bus yrityksen valmistama sähköbussi on kooltaan ja sähkönkulutukseltaan kilpailukykyinen muihin markkinoilla oleviin sähköbusseihin verrattuna. Matkustajakapasiteetin osalta sähköbussi ei kuitenkaan vastaa nykyään käytössä olevia dieselbusseja. Huonona puolena Caetano Bus yrityksen valmistamassa sähköbussissa on vain yksi käytössä oleva latausmenetelmä. Akkukapasiteetti (150 kWh) ei mahdollista varikolatauskonseptin käyttöä, mutta toisaalta bussilla ei ole

mahdollista liikennöidä välilatauksin virroitin- ja induktiolatausmahdollisuuksien puuttuessa. Hyvänä puolena on se, että Caetano Bus osallistuu käynnissä olevaan kansalliseen eBus-hankkeeseen, minkä ansiosta kalustovalmistajalla on kokemusta sähköbussiliikennöinnistä kylmissä olosuhteissa.

Ebusco tarjosi hyvin niukasti tietoa omasta sähköbussikalustostaan. Lisää tietoa ja käyttökokemuksia saataneen kuitenkin tällä hetkellä käynnissä olevasta kansallisesta eBus-hankkeesta, jossa Ebusco on ollut mukana joulukuusta 2013 lähtien. Hyviä puolia Ebuscon valmistamassa sähköbussikalustossa ovat sen erittäin pieni sähkönkulutus ja pitkä käyttöhistoria Kiinassa. Matkustajakapasiteetti on kohtuullinen, mutta ei siltikään kilpailukykyinen nykyään liikennöivien dieselbussien matkustajakapasiteetille. Ebusco pystyy toimittamaan kaikki tarvittavat komponentit ja järjestelmät sähköbussin rakentamiseen. Ebuscon sähköbussiteknologia soveltuu myös dieselbussien muuttamiseen sähköbusseiksi.

Siemens/Rampini sähköbussi on ensimmäinen sarjavalmistainen sähkölinja-auto Euroopassa ja niitä on ollut syksystä 2012 asti normaalissa linjaliikenteessä Wienin keskustassa. Siemens/Rampini sähköbussi ei kuitenkaan näyttäydy edukseen sähköbussien vertailussa sen olemattoman matkustajakapasiteetin ja suuren omapainon takia. Sähköbussin sähkönkulutus on täysin samaa luokkaa sen kilpailijoiden 12-metrinen sähköbussien kanssa ja talvella sen sähkönkulutus on yli kaksinkertainen Ebuscon valmistamaan sähköbussiin verrattuna. Siemens/Rampini sähköbussissa on mahdollisuus erilaisiin akkupaketteihin ja latausmenetelmiin. Siemens pystyy toimittamaan sähköbusseihin kaiken sähköteknologian ja Siemensin sähköteknologia soveltuu myös dieselbussien muuttamiseen sähköbusseiksi.

Solaris Bus & Coach yritys on vertailussa olevista yrityksistä ainoa, jolla on markkinoilla kaksi kaupunkiliikenteeseen tarkoitettua sähköbussia. Molemmat sähköbussit vaikuttavat hyvin suunnitelluilta ja erittäin käyttökelpoisilta. Pienempi yhdeksänmetrinen bussi hyödyntää kaapelilatausta, mutta 12-metriseen bussiin on tarjolla useampia latausmenetelmiä. Sähköbussin akkukapasiteetti määritetään bussin tulevaan reittiprofiiliin perustuen. Matkustajakapasiteetiltaan sähköbussit eivät ole kilpailukykyisiä nykyään käytössä oleville dieselbusseille.

VDL Bus & Coach yrityksen valmistama sähköbussi on erittäin kevytrakenteinen ja sen matkustajakapasiteetti on suuri. Matkustajakapasiteetti kuitenkin vaihtelee tarvittavan akkukapasiteetin mukaan. Mitä suurempi akkukapasiteetti tarvitaan, niin sitä vähemmän matkustajakapasiteettia saadaan. Sähköbussissa on monipuoliset latausmenetelmävaihtoehdot ja siihen on tarjolla erikokoisia akkupaketteja. Sähköbussin sähkönkulutuksesta ei ollut saatavilla tietoa, mutta erittäin kevyt rakenne antaa ainakin mahdollisuudet erittäin pieneen sähkönkulutukseen. Hyvänä puolena on myös se, että sähköbussi on aloittanut liikennöinnin Espoossa osana eBus-hanketta keväällä 2014. Talven 2014 jälkeen nähdään sen toimintakyky ja sähkönkulutus Suomen kylmissä olosuhteissa.

Vertailussa edukseen näyttäytyivät Ebusco, Solaris Bus & Coach sekä VDL Bus & Coach. Ebusco on osoittanut toimivuutensa ja energiatehokkuutensa yli kahden vuoden aikana Kiinassa sekä todistanut pystyvänsä liikennöimään myös Suomen kylmissä olosuhteissa vain 1 kWh/km sähkönkulutuksella. Tietoja akkukapasiteetti- ja latausmenetelmävaihtoehtoista tulisi kuitenkin saada lisää. Solaris Bus & Coach ja VDL Bus & Coach yritysten 12 metriset sähköbussit vaikuttavat potentiaalisilta vaihtoehtoilta sähköbussiliikennöintiin, mutta tietoja bussien sähkönkulutuksesta ja suorituskyvystä Suomen kylmissä liikennöintiolosuhteissa tulisi saada lisää.

Vertailussa selkeitä puutteita osoittivat BYD, Caetano Bus ja Siemens/Rampini. BYD yrityksen valmistamassa sähköbussissa on erittäin suuri akkukapasiteetti, joka lisää bussin painoa ja korkeutta merkittävästi. Suuri akkukapasiteetti nostaa myös sähköbussin hankintakustannuksia. BYD ja Caetano Bus yritysten valmistamissa sähköbusseissa ei ole mahdollisuutta yhdistelmä- tai pikalatauskonseptin käyttöön. Siemens/Rampini sähköbussin kohtaloksi osoittautui sen olematon matkustajakapasiteetti, joka ei tarjoa todellista vaihtoehtoa joukkoliikennetähtäimiksi Suomessa. Siemens/Rampinin kehittämään 12-metriseen sähköbussiin toivoisi pienemmän kulutuksen mahdollistavaa kevyttä runkoa, suurempaa matkustajakapasiteettia sekä akkujärjestelmää, joka kestäisi paremmin kylmiä olosuhteita.

4.7 Sähköbussiliikennöinti kylmissä olosuhteissa

Sähköbussiliikennöinnistä kylmissä olosuhteissa ei ole vielä kovinkaan paljon kokemusta, mutta sähköautojen saralla kokemusta ja tutkimustuloksia on jo saatavilla. Suomi, Ruotsi, Norja ja Islanti ovat toteuttaneet RekkEVIDde-hankkeen, jossa tehtiin sähköautoille kenttä- ja laboratoriotutkimuksia kylmissä olosuhteissa. Hankkeen päätavoitteena oli selvittää sähköajoneuvojen realistinen suorituskky operoitaessa Pohjoismaissa ajo- ja sääolosuhteissa. Hankkeen toivotaan auttavan ajoneuvoteollisuutta kehittämään Pohjoismaisiin olosuhteisiin soveltuvia sähköajoneuvoja. Hankkeen tuloksia voidaan soveltaa myös sähköbussiliikennöintiin. (RekkEVIDde 2014; TransEco 2013)

RekkEVIDde-hankkeessa sähköautoja tutkitaan lämpötilaolosuhteissa + 23 °C, 0 °C ja - 20 °C. Lämpötiloissa + 23 °C ja 0 °C tutkimuksia tehdään ajo-olosuhteissa, jotka vastaavat puhdasta asfalttia ja lämpötilassa - 20 °C ajo-olosuhteissa, jotka vastaavat puhdasta asfalttia, vanhaa lunta ja uutta lunta. Tutkimuksessa mallinnetaan myös erilaisia ajoympäristöjä, kuten kaupunkiajoa ja ajamista moottoritieillä. Tutkimuksessa on mitattu viiden markkinoilla olevan sähköauton energiankulutusta ja ajomatkaa. Kyseiset sähköautot ovat Citroën C-Zero, Nissan Leaf, Renault Kangoo, Tesla Roadster ja Volvo C30 Electric. Lisäksi on tutkittu myös auton sisäilman lämmityksen ja ilmastoinnin vaikutusta sähköautojen energiankulutukseen ja ajomatkkaan. (RekkEVIDde)

Tutkimusten perusteella kylmä ilma ja haitalliset ajo-olosuhteet, kuten lumi tien pinnassa, kasvattavat sähköajoneuvojen sähkönkulutusta ja lyhentävät ajomatkaa. Lämpötilan laskiessa + 23 °C → - 20 °C sähköajoneuvojen sähkönkulutus kasvaa kaupun-

kiolosuhteissa keskimäärin 36 % ja ajomatka lyhenee keskimäärin 27 %. Sähkönkulutuksen kasvu kylmällä ilmalla johtuu ilmanvastuksen ja vierintävastuksen kasvamisesta. Ilmanvastus on -20 °C lämpötilassa noin 10 % suurempi kuin $+23\text{ °C}$ lämpötilassa ja lumisen tien vierintävastus voi olla jopa 40 % suurempi kuin puhtaan asfaltin. Lisäksi jäisellä tiellä ajettaessa tien pinnan kitkakertoimen pieneneminen heikentää jarrutusenergian talteenottoa. (RekkEVIDde; TransEco 2013; Samu Kukkonen & Veikko Karvonen 2014)

Tutkimusten perusteella sähköajoneuvojen sähkönkulutukseen vaikuttaa olennaisesti myös sisäilman lämmitys ja ilmastointi. Sisäilman lämmitystä käytettäessä -20 °C lämpötilassa sähkönkulutus kasvaa keskimäärin 50 % ja ajomatka lyhenee keskimäärin 35 % verrattuna $+23\text{ °C}$ lämpötilaan, kun ilmastointi ei ole päällä. Sisäilman lämmityksen käyttö voi pahimmillaan kasvattaa sähkönkulutusta jopa 75 %. Käytettäessä kaupunkiolosuhteissa ilmastointia $+23\text{ °C}$ lämpötilassa ja sisäilman lämmitystä -20 °C lämpötilassa sähkönkulutus -20 °C lämpötilassa on noin 28 % suurempi. (RekkEVIDde)

Tutkimus osoittaa selkeästi, että kylmän ilman, haitallisten ajo-olosuhteiden ja sisäilman lämmityksen vaikutus sähköajoneuvojen sähkönkulutukseen on merkittävä. Sähkönkulutuksen kasvu on erityisen suurta keskimääräisen ajonopeuden ollessa alhainen. Wienissä liikennöivät Siemens/Rampini-sähköbussit tukevat RekkEVIDde-hankkeen tutkimustuloksia. Wienissä sähköbussien sähkönkulutus vaihtelee 1,2–2,5 kWh/km välillä sen mukaan liikennöidäänkö sähköbussilla kesällä vai talvella. Näin ollen sähköbussien sähkönkulutus voi kasvaa jopa 100 % kylmissä olosuhteissa liikennöitäessä. Kylmissä olosuhteissa sähkönkulutusta voidaan kuitenkin pienentää ajoneuvon esilämmittämällä ja käyttämällä polttoainekäyttöistä sisäilman lämmitintä. (Batteriebus Wien 2014; RekkEVIDde)

Lämpötilan, sisäilman lämmityksen ja ilmastoinnin vaikutusten lisäksi tutkimuksesta on havaittavissa sähköajoneuvojen soveltuvuus kaupunkiajoon. Moottoritiellä ajattaessa sähköautojen sähkönkulutus on 37 % suurempi ja ajomatka 27 % lyhyempi kuin kaupunkiolosuhteissa. Sähköajoneuvot soveltuvat parhaiten kaupunkiajoon ajonopeuksien ansiosta. Ajonopeuden nousu, siirryttäessä maantieajoon, kasvattaa ilmanvastusta ja tätä kautta myös sähkönkulutusta. (RekkEVIDde; TransEco 2013) Taulukossa 16 on esitetty ajo-olosuhteiden, lämpötilan, ilmastoinnin ja sisäilman lämmityksen vaikutukset RekkEVIDde-hankkeessa tutkittujen sähköautojen sähkönkulutukseen ja ajomatkään. Taulukossa esitetyt tulokset ovat keskiarvoja. Tutkimustulokset sähköautojen välillä ovat suuria.

Taulukko 16 Ajo-olosuhteiden, lämpötilan, ilmastoinnin ja sisäilman lämmityksen vaikutukset RekkEVIDde-hankkeessa tutkittujen sähköautojen sähkönkulutukseen ja ajomatkaan. (RekkEVIDde)

	Sähkönkulutuksen kasvu	Ajomatkan lyheneminen
Kaupunkiolosuhteet + 23 °C → - 20 °C (ei ilmastointia, ei lämmitystä)	36 %	27 %
Kaupunkiolosuhteet + 23 °C → - 20 °C (ei ilmastointia, sisäilman lämmitys)	50 %	35 %
Kaupunkiolosuhteet + 23 °C → - 20 °C (ilmastointi ja sisäilman lämmitys)	28 %	ets.
Kaupunkiolosuhteet + 23 °C vs. Maantieolosuhteet + 23 °C	37 %	27 %

ets. = ei tietoa saatavilla

Edellä käsiteltyjen aihepiirien lisäksi sähköbussiliikennöinti vaikeutuu kylmissä olosuhteissa akkuteknologian käytöstä johtuen. Kylmä ilma vaikeuttaa akkujen lataamista ja purkamista. Kylmällä ilmalla akkujen latautuminen hidastuu, mikä vaikeuttaa pika- ja yhdistelmälatauskonseptin käyttöä. Akkujen käyttö ja lataaminen kylmissä olosuhteissa voi myös lyhentää akkujen elinikää. Akkujen käytettävyyttä ja ladattavuutta kylmissä olosuhteissa voidaan kuitenkin parantaa akkujen hyvällä eristyksellä. Hyvä eristys pienentää ulkolämpötilan vaihteluiden vaikutusta akkujen lämpötilaan.

Lisää tietoa sähköajoneuvojen käytöstä kylmissä olosuhteissa löytyy RekkEVIDde-hankkeen loppuraportista osoitteesta <http://www.energiogtransport.net/content/wp-content/uploads/2011/03/1.-RekkEVIDde.pdf>. Lisätietoja sähköbussiliikennöinnistä kylmissä olosuhteissa saataneen kansallisesta eBus-hankkeesta talven 2014–2015 aikana, jolloin Espoossa on liikennöinnissä BYD, Caetano Bus, Ebusco ja VDL Bus & Coach yritysten valmistamat sähköbussit.

5 SÄHKÖBUSSIT TURUN SEUDULLA

5.1 Suositus valittavaksi käyttökonseptiksi, latausmenetelmäksi ja akkutyypiksi

Varikkolatauskonseptissa positiivista on pienet latausinfrastruktuurin hankintakustannukset sekä konseptin helppo ja nopea käyttöönotettavuus. Negatiivisia puolia ovat suuri akkukapasiteetti, lyhyt operointiaika ja – säde, pitkä latausaika, akkujen lyhyt elinikä sekä korkeat sähköbussikaluston hankinta- ja liikennöintikustannukset. Varikkolatauskonseptin valinnalla voidaan minimoida latausinfrastruktuurin hankintakustannukset, mutta samalla konsepti pakottaa maksimoimaan sähköbussikaluston hankintakustannukset. Varikkolatauskonseptissa suuret liikennöintikustannukset aiheutuvat akkukapasiteetin uusimisen tarpeesta.

Pikalatauskonseptissa positiivista on pieni akkukapasiteetti, rajaton operointiaika- ja säde, mahdollisuus operoinnin aikaiseen pikalataukseen, akkujen pitkä elinikä, kohtuulliset sähköbussikaluston hankintakustannukset sekä pienet liikennöintikustannukset. Negatiivisia puolia ovat isot investoinnit pysäkkien ja kääntöpaikkojen latausinfrastruktuuriin sekä suuret latausinfrastruktuurin hankintakustannukset. Pikalatauskonseptissa saadaan latausinfrastruktuuriin panostamalla minimoitua sähköbussikaluston hankintakustannukset sekä liikennöintikustannukset. Samalla mahdollistetaan automaattinen, sujuva ja matkustajalle huomaamaton latauskonsepti osana normaalia bussiliikennöintiä.

Yhdistelmälatauskonsepti on varikkolatauskonseptin ja pikalatauskonseptin yhdistelmä, jolla pyritään saavuttamaan molempien latauskonseptien parhaat puolet. Yhdistelmälatauskonseptissa positiivista on pieni akkukapasiteetti, pitkä operointiaika- ja säde, mahdollisuus operoinnin aikaiseen pikalataukseen, akkujen pitkä elinikä, kohtuulliset sähköbussikaluston ja latausinfrastruktuurin hankintakustannukset sekä pienet liikennöintikustannukset.

Käyttökonsepteista varikkolatauskonsepti on kaikkein kankein ja pikalatauskonsepti kaikkein joustavin. Yhdistelmälatauskonsepti on edellisten välimuoto. Sekä varikkolatauskonseptista että pikalatauskonseptista on löydettävissä positiivisia ja negatiivisia puolia, mutta yhdistelmälatauskonseptista on löydettävissä vain positiivisia puolia. Tämä johtuu siitä, että hyvällä linjakohtaisella suunnittelulla yhdistelmälatauskonseptissa yhdistyy sekä varikko- että pikalatauskonseptin parhaat puolet. Näin ollen suositellaan valittavaksi käyttökonseptiksi yhdistelmälatauskonseptia. Tästä eteenpäin diplomityö perustuu yhdistelmälatauskonseptin käyttöön.

Latausmenetelmän valinta riippuu valitusta käyttökonseptista. Varikkolatauskonseptissa kannattaa käyttää kaapelilatausta, pikalatauskonsepti voidaan toteuttaa käyttämällä virroitin- tai induktiolatausta ja yhdistelmälatauskonsepti käyttäen kaapeli-, virroitin- tai

induktiolatausta. Yhdistelmä latauskonseptissa kaapelilatausta käytetään pienitehoisessa latauksessa varikolla ja virroitin- tai induktiolatausta operoinnin aikaisessa pikalatauksessa. Kaapelilataus voidaan suorittaa jakeluverkkoon liitettyä teollisuuskaapelia tai kaapelilatauslaitetta käyttäen. Pienempien kustannusten perusteella suositellaan valittavaksi varikkolatausmenetelmäksi jakeluverkkoon liitettyä teollisuuskaapelia.

Virroitinlatauksessa latausteho on korkeintaan 400 kW ja induktiolatauksessa korkeintaan 200 kW. Virroitinlatauslaitteet ovat yli 3 metriä korkeita kohtuullisen paljon tilaa vieviä laitteita, joiden ulkomuoto on kuitenkin monilta osin räätälöitävissä tilaajan maun mukaan. Induktiolatauslaitteet näyttävät maahan asennettuina laatalta tien pinnassa ja ovat hyvin huomaamaton elementti osana katuinfrastruktuuria. Latausstandardeja kumpaan latusmenetelmään ei ole olemassa. Induktiolatauslaitteiden lisäriskinä virroitinlatauslaitteisiin verrattuna on niiden toimintaepävarmuus sekä sähköbussin vaikea asemointi induktiolatauslaitteelle. Induktiolatauslaitteet ovat virroitinlatauslaitteita kalliimpia. Suuremman lataustehon, paremman toimintavarmuuden ja pienempien kustannusten perusteella suositellaan valittavaksi pikalatausmenetelmäksi virroitinlatausta.

Akkutyypin valinta riippuu valitusta käyttökonseptista sekä joukkoliikennelinjasta, jolla sähköbussiliikennöinti toteutetaan. Varikkolatauskonseptia käytettäessä LFP-akku on aina mahdollinen vaihtoehto. Yhdistelmä latauskonseptia käytettäessä akkutyypin valinta on tehtävä linjakohtaisesti. Suuri pikalatausteho kasvattaa tarvittavaa akkukapasiteettia LFP-akkua käytettäessä. LTO-akku pystyy vastaanottamaan suuren lataustehon pienemmällä kapasiteetilla, mutta on kustannuksiltaan kalliimpi. Pikalatauskonseptia käytettäessä LTO-akku on ainut vaihtoehto valittavaksi akkutyypiksi. Käytännössä akkutyypiksi voidaan valita LFP-akku vain silloin kun lataustehot voidaan pitää pieninä.

Lataustehon vastaanottokyvyn lisäksi akkutyypin valinnassa on huomioitava akkutyypin muut ominaisuudet. LTO-akun syklikesto (> 12000) on huomattavasti LFP-akun syklikestoa (1000–3000) suurempi ja näin ollen LTO-akun valinta kasvattaa todennäköisyyttä sille, että sähköbussiin ei tarvitse ostaa uusia akkuja lähitulevaisuudessa. LTO-akku olisi myös turvallinen vaihtoehto laajemman toiminta- ja latauslämpötilaikkunan ansiosta. LFP-akun suuri energiatiheys mahdollistaa suuremman akkukapasiteetin pienemmällä lisäpainolla ja matkustajakapasiteetin menetyksellä. LTO-akku taas mahdollistaa pikalatauskonseptin käytön.

Yhdistelmä latauskonseptissa käytettävä akkutyyppi voi olla joko LFP- tai LTO-akku sähköistettävästä joukkoliikennelinjasta riippuen. Suositellaan kuitenkin ensisijaisesti valittavaksi akkutyypiksi LTO-akkua sen hyvän syklikeston, laajan toimintalämpötilaikkunan ja suuren tehotiheyden ansiosta. Kyseisillä ominaisuuksilla mahdollistetaan akkujen pitkä elinikä ja liikennöinti tarvittavissa lämpötilaolosuhteissa. Luvussa 6 tutkitaan tarkemmin akkutyypin valinnan vaikutusta sähköbussin akkukapasiteettiin, lataustehoon, hankinta- ja liikennöintikustannuksiin, akkujen purku-lataussyklin syvyyteen ja elinikään sekä vaihtoehtojen pilottilinjojen taloudelliseen kannattavuuteen.

5.2 Sähköbussiliikennöinnin kriteerit

Sähköbussiliikennöinnin kriteerejä käytetään valittaessa potentiaalisia joukkoliikennelinjoja sähköbussiliikennöintiin. Kriteereihin vaikuttaa sekä joukkoliikennejärjestelmän että sähköbussitekniikan kehitysaste. Tästä johtuen kriteerit eivät ole pysyviä, vaan tulevat muuttumaan lähitulevaisuudessa. Sähköbussiliikennöinnin kriteereihin vaikuttaa myös joukkoliikenteen toimivaltaisen viranomaisen asettamat tavoitteet sähköbussiliikennöinnille.

Lisäksi sähköbussiliikennöinnin kriteerit vaikuttavat toinen toisiinsa. Jos esimerkiksi akkukapasiteetin ja pikalataustehon tarve ovat toivottua suurempia, voi latausaikojen pidentäminen kalustokiertoa muuttamalla olla ratkaisu kannattavan sähköbussiliikennöinnin mahdollistamiseen. Tällöin akkukapasiteetin ja pikalataustehon tarvetta saadaan pienennettyä huomattavasti, mutta samalla joudutaan tyytymään joukkoliikennelinjan huonompaan vuorotarjontaan. Sähköbussiliikennöinnin kriteerejä tulkittaessa onkin aina muistettava, että joukkoliikennelinjat ovat muokattavissa ja toisen kriteerin täyttymättömyys voi olla korjattavissa toista kriteeriä muokkaamalla.

Tässä diplomityössä sähköbussiliikennöinnin kriteerejä tarkastellaan tilanteessa, jossa sähköbusseja ei ole linjaliikennöinnissä Turun seudulla eikä niille tarvittavaa latausinfrastruktuuria ole olemassa. Tällaisessa tilanteessa kriteerejä on paljon, jolloin on epätodennäköistä löytää joukkoliikennelinja, joka täyttäisi kaikki sähköbussiliikennöinnille asetetut kriteerit. Näin ollen on hyväksyttävä joidenkin kriteerien täyttymättömyys ja pyrittävä löytämään parhaiten sähköbussiliikennöinnille asetetut kriteerit täyttävä joukkoliikennelinja.

Parhaiten kriteerit täyttävän joukkoliikennelinjan löytymiseksi kriteereille annetaan painoarvot sen mukaan kuinka olennaisesti kriteeri vaikuttaa sähköbussiliikennöintiin. Taulukossa 17 on esitetty Turun seudun joukkoliikennejärjestelmää koskevat sähköbussiliikennöinnin kriteerit ja niiden painoarvot. Taulukossa on esitetty myös ehdottomia kriteerejä, joiden on täytyttävä. Joukkoliikennelinjoja, jotka eivät täytä ehdottomia kriteerejä, ei tutkita sähköbussiliikennöinnin potentiaalisuuden kannalta tarkemmin. Painoarvojen 1 ja 2 kriteerejä käytetään luvussa 5.3 potentiaalisten sähköbussilinjojen valintaan.

Taulukko 17 Turun seudun joukkoliikennejärjestelmää koskevat sähköbussiliikennöinnin kriteerit ja niiden painoarvot.

Sähköbussiliikennöinnin kriteeri	Painoarvo
Sähköbussiliikennöinti toteutetaan 100 prosenttisesti sähköenergiaa käyttäen.	Ehdoton
Kalustotyyppi 2-akselinen	1
Linjakohtainen huippunopeus 60 km/h	Ehdoton

Linja on Turun kaupungin sisäinen vakiolinja tai palvelulinja.	Ehdoton
Linja liikennöi Turun kaupungin rajojen sisäpuolella.	Ehdoton
Linja liikennöi keskustassa tai keskustan läheisyydessä.	2
Linjalla on säännöllinen aikataulu.	1
Linjan päätepiste ei vaihtelee.	1
Linja on pysyvä.	Ehdoton
Linjalla voidaan käynnistää sähköbussipilotti lähitulevaisuudessa.	2
Linjan reittiä, aikataulua tai kalustokiertoa ei tarvitse muokata sähköbussiliikennöinnille sopivaksi.	2
Linjalla on potentiaalia sähköbussiliikennöinnin laajentamiseen.	1
Linja on taloudellisesti kannattava.	2
Sähköbussiliikennöintiin tarvittava akkukapasiteetti on korkeintaan 100 kWh ja pikalatausteho korkeintaan 200 kW.	1
Linja ei ole suunniteltu vaiheen 1 raitiotiereitti.	Ehdoton

Taulukossa 17 esitetyistä sähköbussiliikennöinnin kriteereistä kuusi on ehdottomia kriteerejä, joiden on täyttyttävä. Nämä kriteerit määrittelevät, että sähköbussiliikennöinti toteutetaan 100 prosenttisesti sähköenergiaa käyttäen, sähköbussilinjan huippunopeus saa olla korkeintaan 60 km/h, linja on Turun kaupungin sisäinen vakiolinja tai palvelulinja, linja liikennöi Turun kaupungin rajojen sisäpuolella, linja on pysyvä eikä linja ole suunniteltu vaiheen 1 raitiotiereitti.

Ensimmäisen ehdottoman kriteerin on täyttyttävä, sillä tämän diplomityön tarkoituksena on tutkia sähköbussien käyttöönottoa Turun seudun joukkoliikennejärjestelmässä ja näin ollen hybridivaihtoehdot suljetaan tutkimuksen ulkopuolelle. Muut ehdottomat kriteerit perustuvat sähköbussitekniikan nykyisen kehitysasteen asettamiin rajoitteisiin sekä Turun joukkoliikennetoimiston tavoitteisiin.

Linjakohtainen huippunopeus on nykyisen sähköbussitekniikan asettama rajoite, mikä mahdollistaa myös pienen sähkönkulutuksen. Kolmas ehdoton kriteeri perustuu tavoitteeseen, jossa sähköbussiliikennöinti halutaan aloittaa kaikille avoimelta joukkoliikennelinjalta, joka liikennöi vakioaikataululla säännöllisesti ammusta iltaan. Tämän vuoksi työmatka-, koululais- ja yölinjat sekä tarpeen mukaan liikennöivät linjat jätetään tutkimuksen ulkopuolella ja keskitytään tutkimaan Turun kaupungin sisäisiä vakiolinjoja sekä palvelulinjoja. Turun joukkoliikennetoimiston tavoitteena on myös, että sähköbussiliikennöinti aloitetaan linjalta, joka liikennöi tiiviin kaupunkirakenteen alueella ja mielellään mahdollisimman lähellä keskustaa, ja tämän vuoksi asetetaan kriteeriksi liikennöinti Turun kaupungin rajojen sisäpuolella.

Linjan pysyvyys on hyvin olennainen kriteeri. Sähköbussiliikennöinnin aloittaminen vaatii investointeja latausinfrastruktuuriin ja sähköbussikalustoon, eivätkä nämä investoinnit ole taloudellisesti kannattavia linjalla, jolla ei ole jatkuvuutta pitkällä aikajänteellä. Viimeisen ehdottoman kriteerin on täytyttävä, sillä sähköbussiliikennöinti ja Turun raitiotie eivät ole toistensa kanssa kilpailevia vaihtoehtoja, vaan toisiaan täydentäviä ratkaisuja. Tämän vuoksi suunnitellut vaiheen 1 raitiotiereitit jätetään potentiaalisten sähköbussilinjojen tutkimuksen ulkopuolelle.

Ehdottomien kriteerien lisäksi taulukossa 17 on esitetty kriteerejä, joiden täyttymätömyys hyväksytään. Kyseiset kriteerit on painotettu sen mukaan kuinka olennaisesti kriteeri vaikuttaa sähköbussiliikennöintiin. Painoarvon 2 kriteerejä pidetään olennaisimpina sähköbussiliikennöintiin ja sen kustannuksiin vaikuttavina tekijöinä. Painoarvon 1 kriteereihin pystytään sopeutumaan paremmin.

Painoarvon 2 kriteerejä ovat liikennöinti keskustan läheisyydessä, mahdollisuus käynnistää linjalla sähköbussipilotti lähitulevaisuudessa, linjan taloudellinen kannattavuus ja se, ettei linjan reittiä, aikataulua tai kalustokiertoa tarvitse muokata sähköbussiliikennöinnille sopivaksi. Kriteereistä kaksi ensimmäistä liittyy Turun joukkoliikennetoimiston asettamiin tavoitteisiin ja kaksi viimeistä tukee sähköbussiliikennöinnin kustannustehokkuutta. Linjan reitti- ja aikataulumuutokset eivät välttämättä aiheuta lisäkustannuksia linjalle, mutta muutokset kalustokierrossa voivat aiheuttaa merkittäviä lisäkustannuksia. Tämän vuoksi pyritään löytämään linja, jonka kalustokierto on jo valmiiksi sähköbussioperoinnille suotuista, jolloin lisäauton tarvetta ei ole.

Painoarvon 1 kriteerejä ovat kalustotyyppi, säännöllinen aikataulu, päätepisteen vaihtelemattomuus, linjan potentiaalisuus sähköbussiliikennöinnin laajentamiseen sekä sähköbussiliikennöintiin tarvittava akkukapasiteetti ja pikalatausteho. Kalustotyyppi on luokiteltu painoarvon 1 kriteeriksi sen takia, että se on kriteeri, joka tulee muuttumaan lähitulevaisuudessa. Sähköbussitekniikan kehittyessä sähköbussiliikennöinti ei rajoitu enää pelkästään 2-akseliseen kalustoon, vaan lähitulevaisuudessa myös telibusseja on saatavana sähköisinä. Linjan säännöllinen aikataulu on sähköbussioperointia helpottava tekijä, mutta ei välttämätön sähköbussiliikennöinnin onnistumiselle. Aikataulun muuttaminen ei myöskään ole ongelma.

Päätepisteen vaihtelemattomuus ja linjan potentiaalisuus sähköbussiliikennöinnin laajentamiseen ovat olennaisia kriteerejä. Tässä työssä kriteerit on kuitenkin painotettu painoarvolla 1. Tämä johtuu siitä, että molemmat kriteerit vaikuttavat linjan taloudelliseen kannattavuuteen. Päätepisteen vaihtelevuus aiheuttaa yleensä lisälatauspisteiden tarpeen ja laskee tätä kautta linjan sähköistämisen taloudellista kannattavuutta. Linjan potentiaalisuus sähköbussiliikennöinnin laajentamiseen vaikuttaa myös suoraan kannattavuuteen. Linjalla, jossa liikennöi useita autoja, on suuri potentiaali sähköbussiliikennöinnin laajentamiseen. Tällaisilla linjoilla pystytään myös maksimoimaan latauspisteiden käyttöaste ja linjan taloudellinen kannattavuus. Näin ollen linjan taloudellinen kannattavuus on todellisuudessa painotettu painoarvolla 4, mutta se on vain jaettu osiin kolmeksi eri kriteeriksi.

Viimeinen painoarvon 1 kriteeri liittyy akkukapasiteettiin ja pikalataustehoon. Kyseisten kriteerien täyttymiseen voidaan vaikuttaa helposti esimerkiksi latausaikoja tai lataustaajuutta muuttamalla. Tässä tutkimuksessa akkukapasiteetin ylärajana pidetään 100 kWh ja pikalataustehon ylärajana 200 kW. Sähköbussiliikennöinti onnistuu kuitenkin ongelmitta myös isommalla akkukapasiteetilla ja lataustehon arvolla. Akkukapasiteetin suurentaminen nostaa kuitenkin sähköbussikaluston hankintakustannuksia merkittävästi ja pienentää matkustajakapasiteettia. Pikalataustehon kasvattaminen voi aiheuttaa tarvetta kalliimman akkuteknologian hankintaan ja kasvattaa latausinfrastruktuurin hankintakustannuksia. Lataustehon kasvattaminen nostaa myös sähkön hintaa.

5.3 Potentiaalisten sähköbussilinjojen valinta

Potentiaaliset sähköbussilinjat valitaan luvussa 5.2 esitettyjen sähköbussiliikennöinnin kriteerien perusteella. Potentiaalisten sähköbussilinjojen valintaa varten joukkoliikennelinjoista tutkitaan linjapituus, keskustan läheisyys, autojen määrä, päivittäinen operointisäde, päätepisteen vaihtelevuus, mahdollinen latausaika, latauspisteiden määrä, lataustaajuus, linjan taloudellinen kannattavuus, liikennöintisopimus, lisääuton tarve, akkukapasiteetin ja pikalataustehon tarve sekä aikataulun säännöllisyys. Joukkoliikennelinjoja, jotka eivät täyty taulukossa 17 esitettyjä ehdottomia kriteerejä, ei tutkita.

Linja liikennöi keskustan läheisyydessä, jos linja liikennöi Kauppatorin kautta ja ulottuu korkeintaan 10 km päähän Kauppatorilta. Mahdollinen latausaika on laskettu linjojen nykyisen kalustokierron mahdollistamien kääntöaikojen ja tasausaikojen mukaan siten, että tasausajat Kauppatorilla on minimoitu. Latauspisteiden määrä ja lataustaajuus on pyritty optimoimaan niin, että akkukapasiteetin tarve pysyy alle 100 kilowattitunnissa ja latausteho on korkeintaan 200 kW. Latauspisteiden määrässä on huomioitu myös linjan taloudellinen kannattavuus. Lisääuton sekä suuremman akkukapasiteetin tai pikalataustehon tarve on laskettu päivittäisen operointisäteen (korkeintaan), lataustaajuuden ja mahdollisen latausajan perusteella.

Linjan taloudellinen kannattavuus on potentiaalisia sähköbussilinjoja valittaessa otettu huomioon laskemalla latauspisteiden käyttöaste (km/latauspiste/vuosi). Latauspisteiden käyttöaste kertoo vuosittaisen liikennöintimäärän kilometreinä yhtä latauspistettä kohti tilanteessa, jossa koko joukkoliikennelinja on sähköistetty. Käyttöaste on laskettu autojen määrän, päivittäisen operointisäteen (keskiarvo) ja latauspisteiden määrän perusteella. Potentiaalisten sähköbussilinjojen taloudellista kannattavuutta on tutkittu tarkemmin luvussa 5.5.

Liikennöintisopimus kertoo onko linja Turun kaupungin liikenneyhtiön omistama tai jos ei, niin milloin linjan liikennöintisopimus päättyy. Liikennöintisopimusta koskevat tiedot ovat olennaisia valittaessa potentiaalisia sähköbussilinjoja sen perusteella voidaanko linjalla käynnistää sähköbussipilotti lähitulevaisuudessa. Jos linja ei ole Turun kaupungin liikenneyhtiön omistama tai sen liikennöintisopimus ei lopu vuosien 2016–2017 välillä, niin linjalla ei voida käynnistää sähköbussipilottia lähitulevaisuudessa.

Ehdottomat kriteerit täyttäviä joukkoliikennelinjoja on Turun seudulla 25. Kyseisiä linjoja ovat linjat 1, 3, 30, 4, 40, 8, 12, 13, 14, 15, 18, 20, 32A, 50, 51, 53, 54, 55, 56, 61, 88, 99, P1, P2 ja P3. Tämän lisäksi tutkitaan Kakolanmäelle suunniteltu palvelulinja PKakola. Näiden 26 joukkoliikennelinjan joukosta valitaan potentiaaliset sähköbussilinjat taulukossa 17 esitettyjen painoarvojen 1 ja 2 kriteerien perusteella. Taulukossa 18 on esitetty potentiaalisten sähköbussilinjoiden valinnan perusteena oleva pisteytysjärjestelmä, joka perustuu taulukossa 17 esitettyihin painoarvojen 1 ja 2 kriteereihin.

Taulukko 18 *Potentiaalisten sähköbussilinjoiden valinnan perusteena oleva pisteytysjärjestelmä.*

Kalustotyyppi: 2-akselinen	+ 1
Keskustan läheisyys	+ 2
Autojen määrä > 3	+ 1
Päivittäinen operointisäde < 150 km	- 1
Päätepiste ei vaihtelee	+ 1
Mahdollinen latausaika vaihtelee	- 1
km/latauspiste/vuosi > 200 000	+ 2
km/latauspiste/vuosi < 100 000	- 2
Linja on Turun kaupungin liikenneyhtiön omistama tai liikennöintisopimus päättyy 2016-2017	+ 2
Linjalla ei ole lisäauton tarvetta	+ 2
Ei muuta huomioitavaa	+ 1

Autojen määrästä linjalla annetaan yksi lisäpiste, jos autoja on linjalla enemmän kuin 3. Ehdottomat kriteerit täyttävillä joukkoliikennelinjoilla autojen määrä on keskimäärin 3,6. Näin ollen lisäpisteen rajaksi on päätetty 4 autoa. Tällöin linjan potentiaalisuutta sähköbussiliikennöinnin laajentamiseen ei painoteta liiaksi linjoilla, joilla autojen määrä on todellisuudella keskimääräistä pienempi.

Päivittäisen operointisäteen ollessa alle 150 km linjalta vähennetään yksi piste. Tämä perustuu siihen, ettei sähköbussiliikennöintiä kannata aloittaa linjalta, jossa päivittäinen operointisäde on lyhyt. Päivittäisen operointisäteen ollessa lyhyt sähköbussikaluston ja latausinfrastruktuurin käyttöaste jää alhaiseksi. Sekä sähköbussikalusto että latausinfrastruktuuri ovat kalliita hankintoja, eikä niihin kannata investoida, jos niiden käyttöaste on alhainen.

Latauspisteiden käyttöasteesta saa kaksi lisäpistettä, jos vuosittainen liikennöintimäärä yhtä latauspistettä kohden on yli 200 000 km. Linjalta vähennetään kaksi pistettä, jos vuosittainen liikennöintimäärä yhtä latauspistettä kohden on alle 100 000 km. Latauspisteiden käyttöasterajat perustuvat pikalatauspisteiden takaisinmaksuaikaan. Vuosittaisen liikennöintimäärän ollessa yli 200 000 km pikalatauspisteen takaisinmaksuaika on korkeintaan 5 vuotta ja vuosittaisen liikennöintimäärän ollessa alle 100 000 km ta-

kaisinmaksuaika on yli 10 vuotta. Näin ollen on taloudellisesti kannattavampaa hankkia latauspiste linjalle, jossa vuosittaiset liikennöintimäärät ovat suuret.

Linja saa myös yhden lisäpisteen, jos muuta huomioitavaa ei ole. Tämä tarkoittaa sitä, että linjan akkukapasiteetin tarve on alle 100 kWh, pikalatausteho on korkeintaan 200 kW ja varikkolatausteho on korkeintaan 50 kW. Nämä ovat kaikki asioita, jotka helpottavat sähköbussiliikennöintiä ja laskevat sen kustannuksia. Mikään edellä mainituista asioista ei kuitenkaan ole sähköbussiliikennöintiä rajoittava tekijä ja asioihin voidaan vaikuttaa esimerkiksi lataustaajuutta tai latausaikaa muuttamalla. Lisäksi linjalla on oltava säännöllinen aikataulu ja kiertoaika, eikä linjan potentiaalisuus saa olla riippuvainen muiden linjojen sähköistämisestä.

Taulukossa 18 esitettyjen painotettujen kriteerien yhteenlasketut pisteet yhdelle linjalle voivat olla korkeintaan 12 pistettä. Linja luokitellaan potentiaalliseksi sähköbussilinjaksi, kun linja saa vähintään 6 pistettä. Taulukossa 19 on esitetty kaikki ehdottomat kriteerit täyttävät joukkoliikennelinjat pisteineen. Taulukkoon on merkattu vihreällä ja punaisella linjan potentiaalisuuteen vaikuttavia painoarvojen 1 ja 2 kriteerejä. Vihreästä ruudusta linja saa pisteitä painoarvon osoittaman lukuarvon verran ja punaisesta ruudusta linjalta vähennetään pisteitä painoarvon osoittaman lukuarvon verran taulukon 18 mukaisesti. Potentiaaliset sähköbussilinjat on merkattu taulukkoon tumman vihreällä. Taulukossa 19 linjat 1 ja 61 on jaettu kalustokierron mukaisesti kahdeksi eri linjaksi.

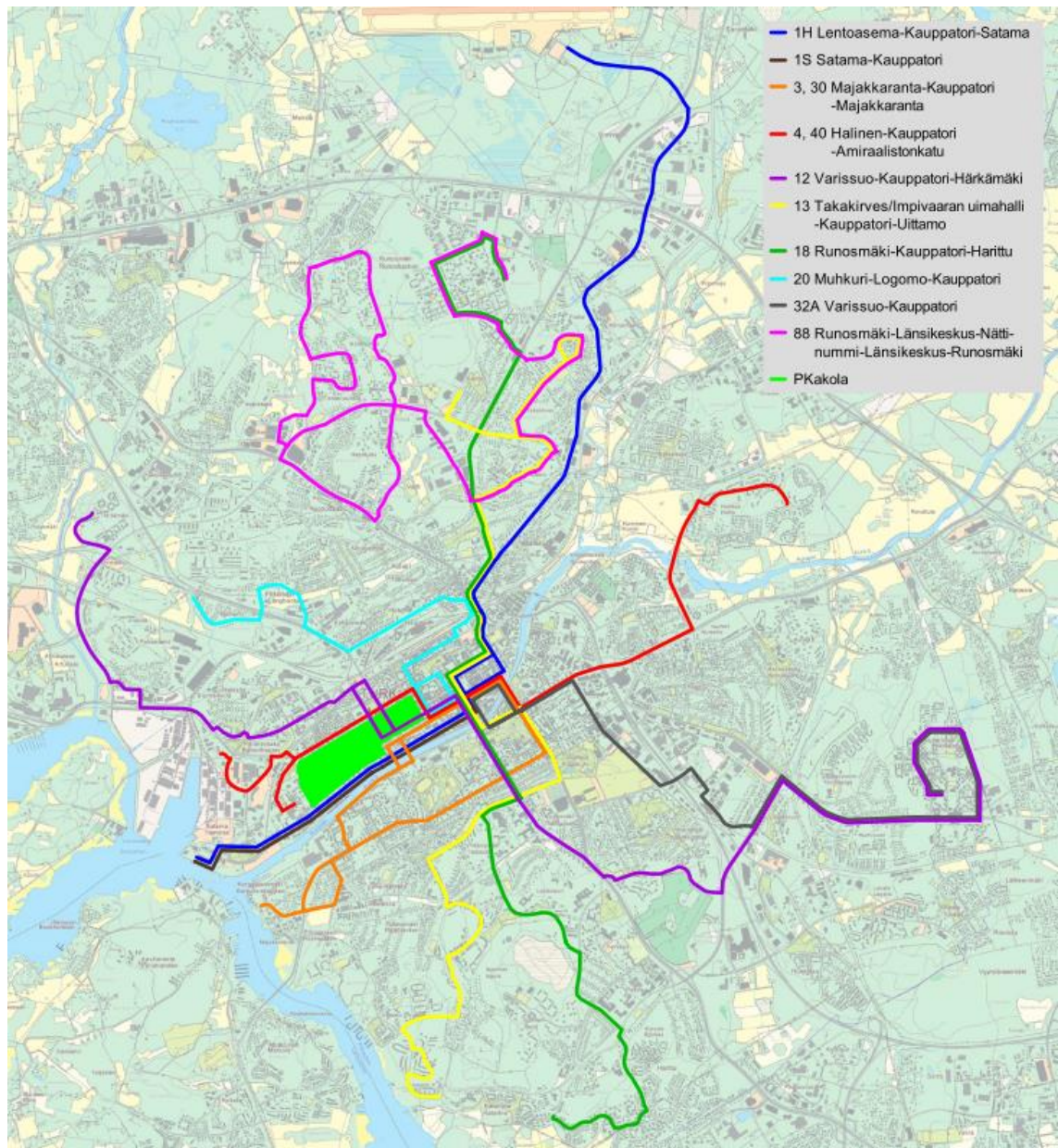
Taulukko 19 Ehdottomat kriteerit täyttävät joukkoliikennelinjat. (Joukkoliikennetoimisto 2014; Kesäaikataulut; Opaskartta; Paikkatietoikkuna; Toimintakertomus 2012)

Linja / Linjatyyppi	Linjapituus (km)	Keskustan läheisyys	Autojen määrä	Päivittäinen operointisäde (km) keskiarvo	Päivittäinen operointisäde (km) korkeintaan	Päättepiste vaihtelee	Mahdollinen latausaika (min) / -paikka	Latauspisteiden määrä	Lataustaajuus (km)	km/latauspiste/vuosi	Liikennöintisopimus (päättyy)	Lisäauton tarve	Muuta huomioitavaa	Pisteet
Kalustotyyppi: 2-akselinen														
3, 30 / Rengaslinja	9	X	4	205	231	Ei	5 / Majakkarakanta	1	9	299 300	TuKL			12
4, 40 / Heiluriliinja	8,5	X	5	165	279	Kyllä	9 / Halinen	1	17	301 125	TuKL	Pyhäpäivinä (3 autoa)		9
8 / Säteislinja	12		2	357	456	Ei	5 ja 5 / Ruissalo ja Kauppatori	2	12	130 305	(2021)		Akkukapasiteetin tarve 100 kWh	4
13 / Heiluriliinja	12,5	X	5	207	325	Kyllä	7 / Uittamo	1	25	377 775	(2021)	Pyhäpäivinä (3 autoa)	Pikalatausteho > 200 kW	6
14, 15 / Heiluriliinja	36,5		5	482	525	Kyllä	Vaihtelee	4	15-25	219 913	(2024)		Epäsäännöllinen aikataulu ja kiertoaika	5
20 / Säteislinja	6	X	2	184	324	Ei	3 / Muhuri	1	12	134 320	(2024)		Pikalatausteho > 200 kW	6
32A / Säteislinja	9	X	3	48	90	Ei	5 / Varissuo	Yhteinen latauspiste linjan 12 kanssa	18	26 352 + 200 020	(2016)		Akkukapasiteetin tarve 105 kWh Oletetaan, että linja 12 tullaan myös sähköistämään	9
88 / Poikittaislinja	17		1	181	187	Ei	7 / Runosmäki	Yhteinen latauspiste linjan 18 kanssa	17	55 205 + 433 620	(2016)		Oletetaan, että linja 18 tullaan myös sähköistämään	8
99 / Poikittaislinja	30		6	231	280	Kyllä	Vaihtelee	3 + Yhteinen latauspiste linjan 13 kanssa	30	140 910	(2016)		Epäsäännöllinen aikataulu ja kiertoaika Oletetaan, että linja 13 tullaan myös sähköistämään	5
P1	14	X	2	99	112	Ei	7 / Lehmusvalkama + 30 min lataus varikolla	1	28	60 390	(2020)		Akkukapasiteetin tarve 130 kWh Varikkolatausteho 90 kW	3

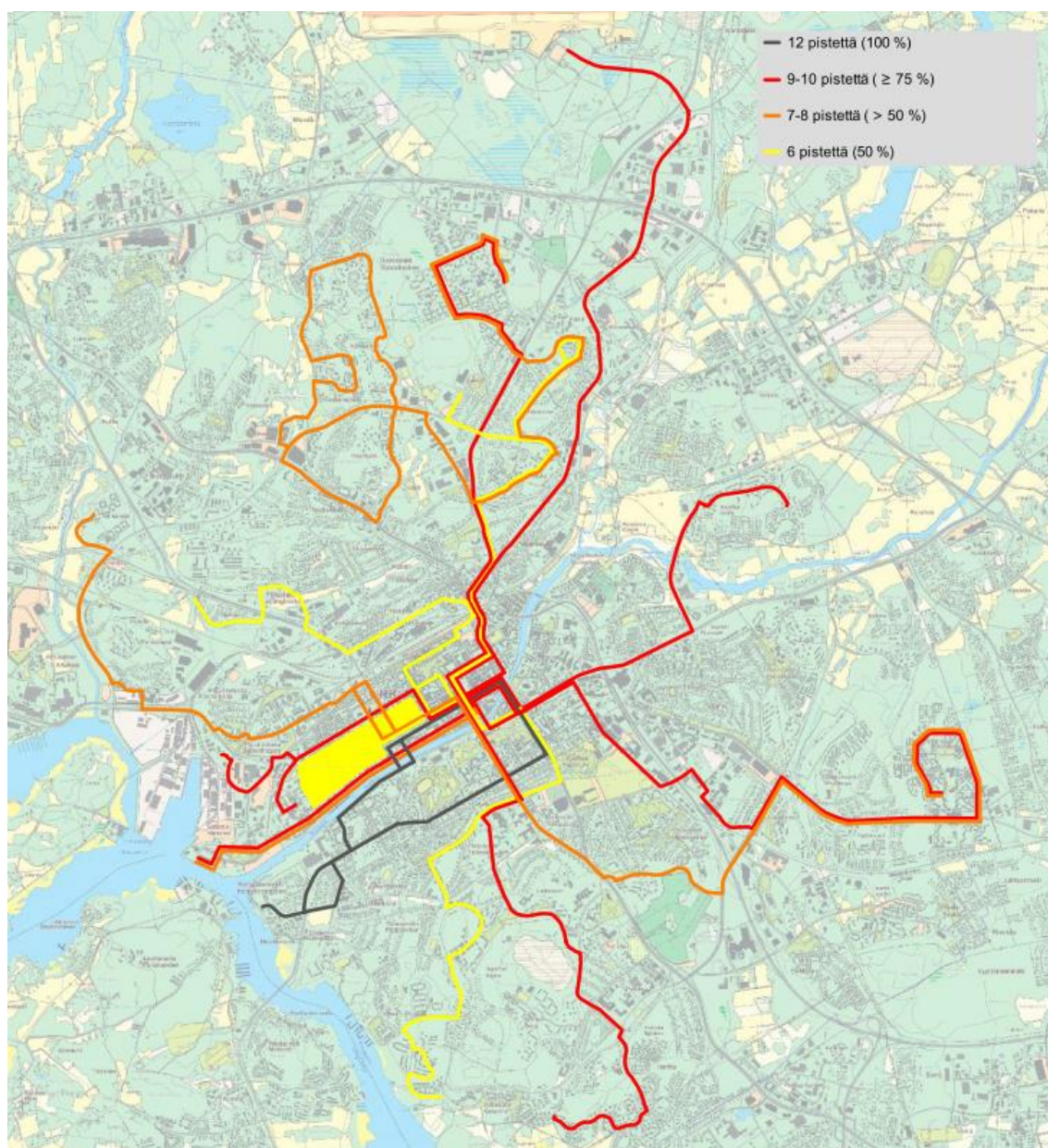
P2	20	X	2	150	160	Ei	5 / Huhkola + 30 min lataus varikolla	1 (muutoksilla voidaan mahdollistaa yhteinen latauspiste linjojen 50, 51, 53 ja 54 kanssa)	40	91 500	(2020)		Akkukapasiteetin tarve 160 kWh Pikalatausteho > 200 kW Varikkolatausteho 90 kW	4
P3	31	X	3	154	186	Ei	5 ja 6 / Mälikkälä ja Ilpoinen + 30 min lataus varikolla	2 (muutoksilla voidaan mahdollistaa yhteinen latauspiste linjan 18 kanssa)	31	70 455	(2020)		Pikalatausteho > 200 kW Varikkolatausteho 90 kW	4
PKakola / Rengaslinja	8	X	1	120	128	Ei	5 / Kakola	1	8	36 600				6
Kalustotyyppi: Telibussi														
1H / Heiluriliinia	12,5	X	4	324	432	Ei	3 ja 5 / Satama ja Lentoasema	2	12,5	236 520	(2016)		Pikalatausteho > 200 kW	10
1S / Säteislinja	3,5	X	2	73	84	Ei	Vaihtelee	Käyttää Sataman latauspistettä	7	53 290 + 236 520	(2016)		Epäsäännöllinen aikataulu ja kiertoaika Oletetaan, että heiluriliinia 1 tullaan myös sähköistämään	7
12 / Heiluriliinia	16	X	4	274	432	Ei	7 ja 8 / Härkämäki ja Varissuo	2	16	200 020	(2024)	Lauantaina (4 autoa)		7
18 / Heiluriliinia	13,5	X	12	215	375	Ei	6 ja 6 / Runosmäki ja Harittu	2	13,5	470 850	(2016)	Pyhäpäivinä (5 autoa)		9
50, 51, 53, 54 / Heiluriliinia	17,5		7	301	420	Kyllä	5, 7 ja 11 / Ylioppilaskylä, Oriniemi ja Papinsaari	3	15-37	256 352	TuKL	Pyhäpäivinä (4 autoa)	Pikalatausteho > 200 kW	5
55, 56 / Heiluriliinia	18		4	281	324	Ei	Vaihtelee	2	18	142 186	TuKL		Epäsäännöllinen aikataulu ja kiertoaika	5
61H / Heiluriliinia	13	X	3	298	338	Ei	3 ja 3 / Ilpoinen ja Vienola	2	13	163 155	(2021)		Pikalatausteho > 200 kW	5
61S / Säteislinja	5,5	X	2	69	77	Ei	2 / Ilpoinen	Käyttää Ilpoisten latauspistettä	11	34 914 + 163 155	(2021)		Oletetaan, että heiluriliinia 61 tullaan myös sähköistämään	4

Taulukon 19 perusteella 28 tutkitusta joukkoliikennelinjasta 13 on potentiaalisia sähköbussilinja. Potentiaalisia sähköbussilinja ovat linjat 1H, 1S, 3, 30, 4, 40, 12, 13, 18, 20, 32A, 88 ja PKakola. Linja 1 on jaettu potentiaalisten sähköbussilinjoiden tutkimista varten kalustokierron mukaisesti kahdeksi linjaksi 1H ja 1S. Linja 1H liikennöi välillä Lentoasema-Kauppatori-Satama ja linja 1S välillä Satama-Kauppatori.

Potentiaalisista sähköbussilinjaista linjat 3 ja 30 ovat potentiaalisimpia täydellä 12 pisteellä. Linja 1H on seuraavaksi potentiaalisin sähköbussilinja 10 pisteellä. Muita vähintään 75 % pisteistä saaneita joukkoliikennelinja ovat linjat 4, 40, 18 ja 32A. Yli 50 %, mutta alle 75 % pisteistä saaneita joukkoliikennelinja ovat linjat 1S, 12 ja 88. Juuri ja juuri potentiaalisuutensa todistaneista eli 50 % pisteistä saaneita joukkoliikennelinja ovat linjat 13, 20 ja PKakola. Kuvassa 23 on esitetty potentiaalisten sähköbussilinjoiden reitit ja kuvassa 24 potentiaalisten sähköbussilinjoiden reitit jaoteltuna linjan potentiaalisuuden mukaan. Linja PKakola on esitetty kuvissa alueena, koska linjan tulevaa reittiä ei ole vielä suunniteltu.



Kuva 23 *Potentiaalisten sähköbussilinjojen reitit.*



Kuva 24 *Potentiaalisten sähköbussilinjojen reitit jaoteltuna linjan potentiaalisuuden mukaan.*

Linjat 3 ja 30 ovat potentiaalisimpia sähköbussilinjoja täyttäen kaikki sähköbussiliikennöinnille asetetut kriteerit. Linjat liikennöivät keskustan läheisyydessä, linjoilla on potentiaalia sähköbussiliikennöinnin laajentamiseen, linjojen päätepiste ei vaihtelee, latauspisteen käyttöaste on korkea, linjat ovat Turun kaupungin liikenneyhtiön omistamia, eikä linjojen reittiä, aikataulua tai kalustokiertoa tarvitse muokata sähköbussiliikennöinnille sopivaksi. Akkukapasiteetin tarve on alle 100 kWh ja käytettävä pikalatausteho korkeintaan 200 kW.

Kolmanneksi potentiaalisin linja sähköbussiliikennöintiin on linja 1H. Linja liikennöi keskustan läheisyydessä, linjalla on potentiaalia sähköbussiliikennöinnin laajentamiseen, linjan päätepisteet eivät vaihtelee, latauspisteiden käyttöaste on korkea ja linjan liikennöintisopimus päättyy syksyllä 2016. Negatiivisena puolena linjalla 1H on lyhyt latausaika (3 min) Sataman päätepisteellä, mikä aiheuttaa suuremman pikalataustehon

tarpeen. Pidempi latausaika voidaan kuitenkin mahdollistaa esimerkiksi linjan reittiä, aikataulua tai kalustokiertoa muokkaamalla. Nykyään linjalla 1H liikennöidään telibussein ja tästä johtuen linjan sähköistäminen pienentää linjan matkustajakapasiteettia.

Seuraavaksi potentiaalisimpia sähköbussilinjoja ovat linjat 4 ja 40. Linjat liikennöivät keskustan läheisyydessä, linjoilla on potentiaalia sähköbussiliikennöinnin laajentamiseen, latauspisteen käyttöaste on korkea ja linjat ovat Turun kaupungin liikenneyhtiön omistamia. Negatiivisia puolia linjoilla ovat päätepisteen vaihtelevuus ja lisäauton tarve pyhäpäivinä. Linjan päätepisteen vaihtelevuus tarkoittaa sitä, että osa linjan vuoroista liikennöi Amiraalistonkadulle ja osa Huolintakadulle. Huolintakadulle liikennöitävien vuorojen määrä on kuitenkin erittäin vähäinen. Pyhäpäivinä linjalla on lisäauton tarve, sillä nykyisen kalustokierron mahdollistama latausaika on 0 minuuttia.

Linja 18 on kuudenneksi potentiaalisin sähköbussilinja. Linja liikennöi keskustan läheisyydessä, linjalla on potentiaalia sähköbussiliikennöinnin laajentamiseen, linjan päätepisteet eivät vaihtelevat, latauspisteiden käyttöaste on korkea ja linjan liikennöintisopimus päättyy syksyllä 2016. Negatiivisena puolena linjalla 18 on lisäauton tarve pyhäpäivinä. Nykyinen kalustokierto mahdollistaa pyhäpäivinä vain 2 minuutin latausajan niin Haritun kuin Runosmäenkin kääntöpaikalla. Näin lyhyt latausaika ei kuitenkaan mahdollista sähköbussiliikennöintiä edes 400 kW pikalataustehoa käytettäessä. Näin ollen vaihtoehtoksi jää kalustokierron muuttaminen pyhäpäivinä. Nykyään linjalla 18 liikennöidään telibussein ja tästä johtuen linjan sähköistäminen pienentää linjan matkustajakapasiteettia.

Linja 32A on seitsemänneksi potentiaalisin sähköbussilinja. Linja häviää vertailussa linjoille 4, 40 ja 18, koska linjan 32A potentiaalisuus on riippuvainen linjan 12 sähköistamisesta. Linja 32A liikennöi keskustan läheisyydessä, linjan päätepisteet eivät vaihtelevat, latauspisteen käyttöaste on korkea ja linjan liikennöintisopimus päättyy syksyllä 2016. Negatiivisia puolia linjalla ovat keskimääräistä pienempi autojen määrä, lyhyt päivittäinen operointisäde, toivottua suurempi akkukapasiteetin tarve sekä riippuvuus linjan 12 sähköistamisesta. Autojen määrä, operointisäde ja riippuvuus linjan 12 sähköistamisesta ovat kriteerejä, joihin ei voida vaikuttaa ilman radikaaleja muutoksia linjan liikennöinnissä. Akkukapasiteetin tarvetta voidaan pienentää linjan reittiä tai kalustokiertoa muuttamalla.

Yli 50 % pisteistä, mutta alle 75 % pisteistä saaneista joukkoliikennelinjoista potentiaalisin sähköbussilinja on poikittaislinja 88. Positiivisia puolia linjassa ovat päätepisteen vaihtelemattomuus, latauspisteen korkea käyttöaste ja liikennöintisopimuksen päättyminen keväällä 2016. Lisäksi linjan akkukapasiteetin tarve on alle 100 kWh, pikalatausteho on korkeintaan 200 kW, linjalla on säännöllinen aikataulu ja kiertoaika, eikä linjalla ole lisäauton tarvetta. Negatiivisia puolia ovat se, ettei linja liikennöi keskustan läheisyydessä, linjalla ei ole potentiaalia sähköbussiliikennöinnin laajentamiseen ja linjan potentiaalisuus on riippuvainen linjan 18 sähköistamisesta.

Yhdeksänneksi potentiaalisin sähköbussilinja on linja 12. Linja liikennöi keskustan läheisyydessä, linjalla on potentiaalia sähköbussiliikennöinnin laajentamiseen, linjan päätepiisteet eivät vaihtelee ja latauspisteiden käyttöaste on korkea. Linja ei ole kaikkein potentiaalisimpien linjojen joukossa, koska linjalla on lauantaicin lisäauton tarve ja linjan liikennöintisopimus päättyy vasta kesällä 2024. Nykyinen kalustokierto mahdollistaa lauantaicin 2 minuutin latausajan Härkämäessä ja 3 minuutin latausajan Varissuolla. Näin lyhyt latausaika ei kuitenkaan mahdollista sähköbussiliikennöintiä edes 400 kW pikalataustehoa käytettäessä. Nykyään linjalla 12 liikennöidään telibussein ja tästä johtuen linjan sähköistäminen pienentää linjan matkustajakapasiteettia.

Samoihin pisteisiin linjan 12 kanssa ylsi linja 1S. Positiivisia puolia säteislinjassa ovat liikennöinti keskustan läheisyydessä, päätepiisteen vaihtelemattomuus, latauspisteiden korkea käyttöaste ja liikennöintisopimuksen päättyminen syksyllä 2016. Negatiivisia puolia ovat lyhyt päivittäinen operointisäde, epäsäännöllinen aikataulu ja kiertoaika, mahdollisen latausajan vaihtelevuus sekä linjan potentiaalisuuden riippuvuus linjan 1H sähköistamisesta. Linja kannattaa käytännössä sähköistää vain siinä tapauksessa, että linja 1H sähköistetaan ja tässäkin tapauksessa sähköbussiliikennöinnin mahdollistaminen vaatii muutoksia linjan aikatauluun ja kalustokierto. Nykyään linjalla 1S liikennöidään telibussein ja tästä johtuen linjan sähköistäminen pienentää linjan matkustajakapasiteettia.

Linjat 13 ja 20 ovat samoin pistein yhdenneksitoista potentiaalisimpia sähköbussilinjoja. Linja 13 liikennöi keskustan läheisyydessä, linjalla on potentiaalia sähköbussiliikennöinnin laajentamiseen ja latauspisteiden käyttöaste on korkea. Linja 20 liikennöi keskustan läheisyydessä, eikä linjan päätepiiste vaihtelee. Lisäksi linjalla 20 ei ole lisäauton tarvetta. Linjan 13 potentiaalisuutta laskee linjan haarautuminen siten, että osa linjan vuoroista liikennöi Takakirveeseen ja osa Impivaaran uimahallille. Lisäksi linjan liikennöintisopimus päättyy vasta kesällä 2021, linjalla on pyhäpäivinä lisäauton tarve ja tarvittava pikalatausteho on yli 200 kW. Linjan 20 potentiaalisuutta laskee keskimääräistä pienempi autojen määrä, latauspisteiden vähäinen käyttöaste, kaukainen liikennöintisopimuksen päättymisajankohta sekä yli 200 kW pikalataustehon tarve.

Kolmanneksitoista potentiaalisin sähköbussilinja on linja PKakola. Linja sai täysin samat pisteet linjojen 13 ja 20 kanssa, mutta sijoittuu silti vertailun viimeiseksi ansaittuaan paikkansa potentiaalisten sähköbussilinjojen joukossa vain sen ansiosta, ettei kyseistä linjaa ole todellisuudessa vielä olemassa. Positiivisia puolia linjassa ovat liikennöinti keskustan läheisyydessä, päätepiisteen vaihtelemattomuus ja linjan olemassaolo suunnittelun tasolla. Se, että linja on olemassa vasta suunnittelun tasolla eikä linjaa todellisuudessa ole olemassa antoi linjalle 5 lisäpistettä. Toteutuessaan linjan päivittäinen operointisäde jäisi kuitenkin hyvin lyhyeksi ja latauspisteiden käyttöaste olisi aivan olematon.

Linjat 14, 15, 55, 56 ja 99 eivät ole potentiaalisia sähköbussilinjoja, koska linjat eivät liikennöi keskustan läheisyydessä, linjoilla on epäsäännöllinen aikataulu ja kiertoaika ja linjojen mahdollinen latausaika vaihtelee. Lisäksi linjojen 14, 15 ja 99 päätepiiste

vaihtelee, linjojen 55, 56 ja 99 latauspisteiden käyttöaste on vähäinen ja linjojen 14 ja 15 liikennöintisopimus päättyy vasta kesällä 2024. Linjat 8, 61H ja 61S eivät ole potentiaalisia sähköbussilinjoja, koska linjoilla ei ole potentiaalia sähköbussiliikennöinnin laajentamiseen, latauspisteiden käyttöaste on vähäinen ja linjojen liikennöintisopimus päättyy vasta kesällä 2021. Lisäksi linja 8 ei liikennöi keskustan läheisyydessä, linjan 61H pikalataustehon tarve on yli 200 kW, linjalla 61S on lyhyt päivittäinen operointisäde ja linjan potentiaalisuus on riippuvainen linjan 61H sähköistämisestä.

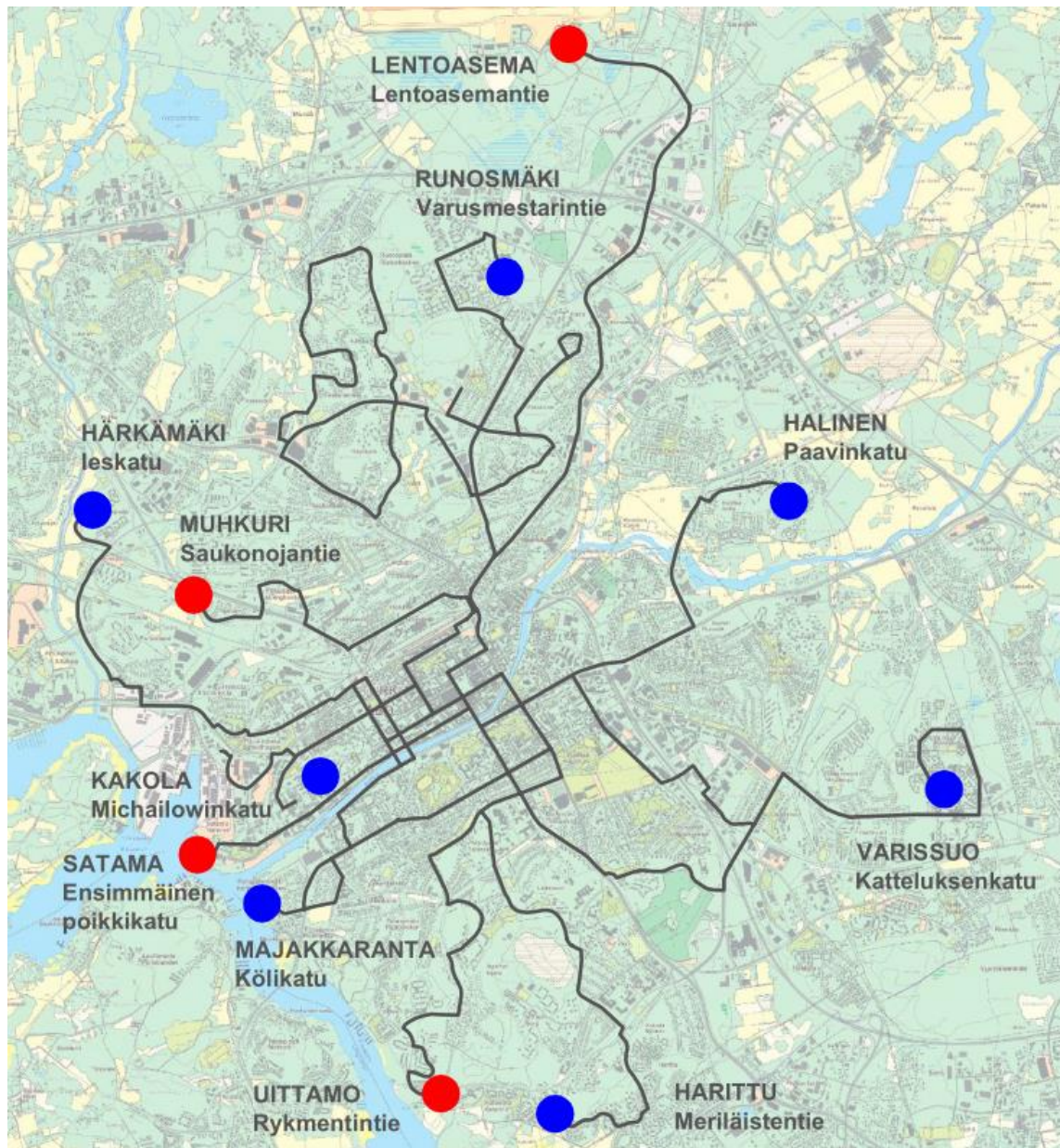
Linjat 50, 51, 53 ja 54 eivät ole potentiaalisia sähköbussilinjoja, koska linjat eivät liikennöi keskustan läheisyydessä, linjojen pääte piste vaihtelee, linjoilla on lisää auton tarve pyhäpäivinä ja linjojen pikalataustehon tarve on yli 200 kW. Palvelulinjat eivät ole potentiaalisia sähköbussilinjoja, koska linjoilla ei ole potentiaalia sähköbussiliikennöinnin laajentamiseen, linjoilla on lyhyt päivittäinen operointisäde, latauspisteiden käyttöaste on vähäinen, linjojen liikennöintisopimus päättyy vasta kesällä 2020, linjojen akkukapasiteetin tarve on yli 100 kWh, tarvittava pikalatausteho yli 200 kW ja varikkolatausteho 90 kW.

5.4 Sähköverkko

Sähköverkko tutkitaan vain luvussa 5.3 valittujen potentiaalisten sähköbussilinjojen 1H, 1S, 3, 30, 4, 40, 12, 13, 18, 20, 32A, 88 ja PKakola latauspisteiden läheisyydessä. Potentiaalisten sähköbussilinjojen latauspisteet on sijoitettu joukkoliikennelinjojen nykyisille tai suunnitelluille kääntöpaikoille. Latauspisteiden sijoittamista Kauppatorille on vältetty Turun joukkoliikennetoimiston pyynnöstä. Linjat 1H ja 1S, 3 ja 30, 4 ja 40, 12 ja 32A sekä 18 ja 88 käyttävät yhteistä latauspistettä. Taulukossa 20 on esitetty potentiaalisten sähköbussilinjojen latauspisteet ja kuvassa 25 kaikki latauspisteet lataustehoineen kartalla.

Taulukko 20 Potentiaalisten sähköbussilinjojen latauspisteet.

Linja	Latauspiste
1H	LENTOASEMA: Lentoasemantie
1H, 1S	SATAMA: Ensimmäinen poikkikatu
3, 30	MAJAKKARANTA: Kölikatu
4, 40	HALINEN: Paavinkatu
12, 32A	VARISSUO: Katteluksenkatu
12	HÄRKÄMÄKI: Ieskatu
13	UITTAMO: Rykmentintie
18, 88	RUNOSMÄKI: Varusmestarintie
18	HARITTU: Meriläistentie
20	MUHKURI: Saukonojantie
Pkakola	KAKOLA: Michailowinkatu



● Latausteho korkeintaan 200 kW

● Latausteho korkeintaan 400 kW

Kuva 25 Potentiaalisten sähköbussilinjojen latauspisteet lataustehoineen kartalla.

Latauspisteen perustaminen vaatii aina uuden sähköverkon rakentamista. Turun seudun paikallinen sähköverkkoyhtiö Turku Energia Sähköverkot Oy huolehtii sähköverkon rakentamisesta ja sähkön jakelusta Turun kaupungin alueella. Latauspisteen sijainnista riippuen sähköverkon rakennustarve vaihtelee. Turku energia hoitaa sähköverkon rakentamisen latauspisteen sijainnista riippumatta ja sähköverkon rakentamisesta aiheutuvat kustannukset Turun kaupungille määräytyvät tarvittavan lataustehon mukaan. Kustannuksiin ei siis vaikuta latauspisteen sijainti, vaan ainoastaan tarvittava latausteho. (Arto Ahonen 2014)

Lentoaseman latauspiste palvelee linjaa 1H. Turku Energialla ei ole nykyään Lentoasemalla omaa muuntamoa, vaan Lentoaseman muuntamo on Finavian omistama. Turku Energia on kuitenkin valmis rakentamaan Lentoasemalle muuntamon sähköbussien sähköjakelua varten. Turku Energian sähköverkkoasiantuntijoiden mukaan Lentorahdintie olisi paras sijainti uudelle muuntamolle. Tällöin olisi toivottavaa, että sähköbussin latauspiste sijaitsisi myös Lentorahdintiellä. Lentoasemalla tarvittava latausteho on 260 kW. (Arto Ahonen 2014)

Toinen linjaa 1H palveleva latauspiste sijaitsee Satamassa. Sataman latauspiste palvelee myös linjaa 1S. Satama on hyvin verkko-omistuskriittinen alue ja tästä johtuen latauspisteen perustaminen Satamaan on hankalaa. Linjan 1 nykyisen kääntöpaikan läheisyydessä ei ole Turku Energian omistamia muuntamoja, jotka mahdollistaisivat sähkönsyötön tulevalle latauspisteelle. Turku Energialla on kuitenkin uusi muuntamo Toisella poikkikadulla, mikä mahdollistaisi sähkönsyötön Sataman latauspisteelle. Tällöin linja 1 reittiä ja kääntöpaikan sijaintia olisi muutettava Sataman päässä. Toinen vaihtoehto on ostaa sähkö Turun Satama Osakeyhtiöltä. Satamassa tarvittava latausteho on 260 kW. (Arto Ahonen 2014)

Linjoja 3 ja 30 palveleva latauspiste sijaitsee Majakkarakannassa. Linjojen nykyisen kääntöpaikan välittömässä läheisyydessä ei ole muuntamoa, mutta sähkönsyöttö latauspisteelle on kuitenkin mahdollistettavissa. Latauspistettä varten Kōlikatua pitkin on kaivettava noin 170 metriä uutta kaapelia, mutta työ on todennäköisesti toteutettavissa viherkaistaa pitkin. Tällöin Kōlikadun asfalttia ei tarvitse rikkoa. Majakkarakannassa tarvittava latausteho on 140 kW. (Arto Ahonen 2014)

Halisten latauspiste palvelee linjoja 4 ja 40. Linjojen nykyisen kääntöpaikan sijainti on erinomainen latauspisteen perustamista varten. Turku Energian muuntamo sijaitsee Hehtokadun ja Paavinkadun kulmassa aivan linjojen 4 ja 40 kääntöpaikan läheisyydessä. Sähkönsyöttö tulevalle latauspisteelle mahdollistetaan olemassa olevalta muuntamolta. Halisissa tarvittava latausteho on 160 kW. (Arto Ahonen 2014)

Varissuon latauspiste palvelee linjoja 12 ja 32A. Linjojen nykyisen kääntöpaikan läheisyydessä on paljon muuntamoja, mutta yksikään muuntamoista ei sijaitse kääntöpaikan välittömässä läheisyydessä. Tästä johtuen latauspisteen sähkönsyötön mahdollistamiseksi uutta kaapelia on kaivettava noin 150 metriä. Varissuon latauspisteen palveluksessa kahta toisistaan riippumatonta linjaa on linjojen sähköistämisessä huomioitava linjojen aikataulujen porrastaminen niin, että sähköbussien lataustarve ei ole samanaikaista. Varissuolla tarvittava latausteho on 200 kW. (Arto Ahonen 2014)

Toinen linjaa 12 palveleva latauspiste sijaitsee Härkämäessä. Sähköverkon osalta latauspisteen perustaminen Härkämäkeen vaatii ainoastaan hieman uuden kaapelin kaivamista. Härkämäessä tarvittava latausteho on 160 kW, jos linjalla 12 kulkevia sähköbusseja ladataan Varissuon latauspisteellä 200 kW latausteholla. Jos latausteho linjalla 12 halutaan pitää samana, tarvittava latausteho Härkämäessä on 180 kW. (Arto Ahonen 2014)

Linjaa 13 palveleva latauspiste sijaitsee Uittamolla. Latauspisteen perustaminen Uittamolle on sähköverkon osalta isotoinen urakka. Latauspisteen sähkönsyöttöä varten Uittamolle on rakennettava uusi muuntamo ja lisäksi urakkaan kuuluu kymmeniä metrejä uuden kaapelin kaivamista. Latauspisteen perustamista Uittamolle hankaloittaa suuren lataustehon tarve. Uittamolla tarvittava latausteho on 290 kW. (Arto Ahonen 2014)

Runosmäen latauspiste palvelee linjoja 18 ja 88. Turku Energialla on nykyään muuntamo Veteraaninkadulla noin 170 metrin päässä tulevasta latauspisteestä. Sähkönsyöttö tulevalle latauspisteelle mahdollistetaan olemassa olevalta muuntamolta. Latauspisteen sähkönsyötön mahdollistamiseksi uutta kaapelia on kaivettava noin 170 metriä. Runosmäen latauspisteen palvellessa kahta toisistaan riippumatonta linjaa on linjojen sähköistämisessä huomioitava linjojen aikataulujen porrastaminen niin, että sähköbussin lataustarve ei ole samanaikaista. Runosmäessä tarvittava latausteho on 180 kW. (Arto Ahonen 2014)

Toinen linjaa 18 palveleva latauspiste sijaitsee Haritussa. Latauspisteen perustaminen Harittuun on sähköverkon osalta hyvin pieni urakka. Turku Energialla on muuntamo linjan 18 nykyisen kääntöpaikan läheisyydessä. Muuntamolta tulevalle latauspisteelle on maassa jo tyhjä putki valmiina ja tällöin latauspisteen perustaminen vaatii ainoastaan uuden kaapelin asentamisen olemassa olevaan tyhjään putkeen. Haritussa tarvittava latausteho on 180 kW. (Arto Ahonen 2014)

Linjaa 20 palveleva latauspiste sijaitsee Muhkurissa. Latauspisteen perustaminen Muhkuriin vaatii uuden muuntamon rakentamista. Uusi muuntamo olisi tulevaa asuinrakentamista ajatellen myös tarpeellinen, mutta uuden muuntamon optimaalinen sijainti ei ole vielä tiedossa. Turku Energian sähköverkkoasiantuntijoiden mukaan uuden muuntamon rakentamisella ei myöskään ole kiirettä. Näistä syistä johtuen Turku Energia ei suosittele latauspisteen perustamista Muhkuriin lähitulevaisuudessa. Muhkurissa tarvittava latausteho on 330 kW. (Arto Ahonen 2014)

Kakolanmäelle Michailowinkadulle sijoitettu latauspiste palvelisi suunniteltua, mutta ei vielä olemassa olevaa palvelulinjaa PKakola. Kakolanmäen infrastruktuuria rakennetaan parhaillaan ja asemakaavassa on muuntamovaraus aivan Michailowinkadun tulevan latauspisteen läheisyydessä. Muuntamoa ei olla kuitenkaan rakentamassa lähitulevaisuudessa. Latauspiste kannattaa perustaa samalla kun asemakaavaan suunniteltu muuntamo rakennetaan. Kakolassa tarvittava latausteho on 110 kW. (Arto Ahonen 2014)

Sähköverkon kannalta helpointa latauspisteiden perustaminen on linjojen 4 ja 40 kääntöpaikalle Halisiin ja linjan 18 kääntöpaikalle Harittuun. Kohtuullisella työllä latauspisteet voidaan perustaa linjojen 3 ja 30 kääntöpaikalle Majakkarantaan, linjojen 12 ja 32A kääntöpaikalle Varissuolle, linjan 12 kääntöpaikalle Härkämäkeen ja linjojen 18 ja 88 kääntöpaikalle Runosmäkeen. Latauspisteiden perustaminen linjan 1H kääntöpaikalle Lentoasemalle, linjan 13 kääntöpaikalle Uittamolle, linjan 20 kääntöpaikalle Muhkuriin ja suunnitellun linjan PKakola kääntöpaikalle Kakolaan vaatii uuden muuntamon

rakentamista. Uusia muuntamoja Muhkuriin ja Kakolaan ei kuitenkaan olla rakentamassa lähitulevaisuudessa. Hankalinta latauspisteen perustaminen on linojen 1S ja 1H kääntöpaikalle Satamaan.

5.5 Potentiaalisten sähköbussilinjojen taloudellinen kannattavuus

Potentiaalisten sähköbussilinjojen taloudelliseen kannattavuuteen vaikuttaa latausinfrastruktuurin ja sähköbussikaluston hankintakustannukset sekä sähköbussiliikennöinnin liikennöintikustannukset. Tässä luvussa potentiaalisten sähköbussilinjojen taloudellista kannattavuutta tutkitaan vertailemalla sähköbussiliikennöinnin kustannuksia dieselbussiliikennöinnin kustannuksiin. Potentiaalisten sähköbussilinjojen taloudellinen kannattavuus on laskettu tilanteessa, jossa koko joukkoliikennelinja on sähköistetty. Näin saadaan selville millä linjoilla on taloudellisesti kannattavaa siirtyä nykyisestä dieselbussiliikennöinnistä sähköbussiliikennöintiin.

Sähköbussiliikennöinnin kustannuksissa on huomioitu latausinfrastruktuuri, sähköverkon rakentaminen, sähköbussikalusto, sähkönkulutus, sähkönjakeluun liittyvä tehomaksu sekä huollon, renkaiden ja varaosien aiheuttamat kustannukset. Dieselbussiliikennöinnin kustannuksissa on huomioitu dieselbussikalusto, polttoainekulut sekä huollon, renkaiden ja varaosien aiheuttamat kustannukset. Linjojen 1S, 32A ja 88 kustannuksissa ei ole huomioitu latausinfrastruktuurin ja sähköverkon rakentamisen kustannuksia eikä tehomaksua, koska linjat käyttävät yhteistä latauspistettä linjojen 1H, 12 ja 18 kanssa. Linjojen 1S, 32A ja 88 kustannuksia laskettaessa on oletettu, että linjat 1H, 12 ja 18 tullaan sähköistämään. Näin ollen linjojen 1S, 32A ja 88 taloudellinen kannattavuus on riippuvainen linjojen 1H, 12 ja 18 sähköistämisestä.

Sähköbussiliikennöinnin kustannukset perustuvat asiantuntija-arvioihin latausinfrastruktuurin ja sähköbussikaluston hankintakustannuksista sekä Turku Energian tietoihin sähköverkon rakentamisen ja sähkönjakelun kustannuksista. Latausinfrastruktuurin ja sähköbussikaluston hankintakustannukset ovat karkeita arvioita. Sähköbussiliikennöinnin sähkönkulutuksena on käytetty 1,5 kWh/km. Dieselbussiliikennöinnin kustannukset perustuvat SL-Autolinjojen ja Veolia Transport Finland Osakeyhtiön tietoihin dieselbussin kulutuksesta ja dieselin hinnasta. Huollon, renkaiden ja varaosien aiheuttamat kustannukset perustuvat VTT:n arvioon. Kustannuslaskelmissa on huomioitu myös dieselbussien hankintakustannukset olettaen, että sähköbussikalusto hankitaan normaalin kaluston uusimisen yhteydessä.

Potentiaalisten sähköbussilinjojen hankinta- ja liikennöintikustannukset on laskettu taulukossa 21 esitettyjen kustannusten perusteella. Kustannuslaskelmissa on käytetty hyväksi taulukossa 19 esitettyjä joukkoliikennelinjojen tietoja sekä luvussa 5.4 esitettyjä linjakohtaisia pikalataustehon arvoja. Taulukossa 22 on esitetty potentiaalisten sähköbussilinjojen hankinta- ja liikennöintikustannukset sekä sähkö- että dieselbussiliikennöintiä käytettäessä. Taulukossa on esitetty myös potentiaalisten sähköbussilinjojen

latausinfrastruktuurin ja sähköbussikaluston takaisinmaksuaika. Taulukossa on korostettu punaisella värillä linjojen taloudellista kannattavuutta vähentäviä kustannuksia ja vihreällä värillä taloudellista kannattavuutta tukevia kustannuksia.

Taulukko 21 Sähkö- ja dieselbussiliikennöinnin kustannukset. (Arto Ahonen 2014; SL-Autolinjat 2014; Turku Energia; Veolia Transport Finland Oy 2014; VTT 2013)

	Sähkö	Diesel
Latausinfrastruktuuri	400 000 €	0 €
Sähköverkon rakentaminen	174 €/kW	0 €
Kalusto	500 000 €	300 000 €
Energia	0,128 €/km	0,462 €/km
Tehomaksu	99,2 €/kk + 3,4 €/kW/kk	0 €
Huolto, renkaat ja varaosat	0,2 €/km	0,25 €/km

Taulukko 22 Potentiaalisten sähköbussilinjojen hankinta- ja liikennöintikustannukset.

Linja	Bussi	Hankintakustannukset			YHT.	Liikennöintikustannukset/a			YHT.	Takaisinmaksuaika (a)
		Latausinfrastruktuuri	Sähköverkon rakentaminen	Kalusto		Energia	Tehomaksu	Huolto, renkaat ja varaosat		
1H	sähkö	800 000	90 480	2 000 000	2 890 480	60 682	22 406	94 608	177 696	10,5
	diesel	0	0	1 200 000	1 200 000	218 544	0	118 260	336 804	
	erotus	800 000	90 480	800 000	1 690 480	-157 863	22 406	-23 652	-159 109	
1S	sähkö	0	0	1 000 000	1 000 000	6 836	0	10 658	17 494	> 30
	diesel	0	0	600 000	600 000	24 620	0	13 323	37 943	
	erotus	0	0	400 000	400 000	-17 784	0	-2 665	-20 449	
3, 30	sähkö	400 000	24 360	2 000 000	2 424 360	38 394	6 902	59 860	105 157	11,5
	diesel	0	0	1 200 000	1 200 000	138 277	0	74 825	213 102	
	erotus	400 000	24 360	800 000	1 224 360	-99 882	6 902	-14 965	-107 945	
4, 40	sähkö	400 000	27 840	2 500 000	2 927 840	38 628	7 718	60 225	106 572	13,0
	diesel	0	0	1 500 000	1 500 000	139 120	0	75 281	214 401	
	erotus	400 000	27 840	1 000 000	1 427 840	-100 491	7 718	-15 056	-107 829	
12	sähkö	800 000	62 640	2 000 000	2 862 640	51 317	15 878	80 008	147 204	12,0
	diesel	0	0	1 200 000	1 200 000	184 818	0	100 010	284 828	
	erotus	800 000	62 640	800 000	1 662 640	-133 501	15 878	-20 002	-137 625	
13	sähkö	400 000	50 460	2 500 000	2 950 460	48 461	13 022	75 555	137 038	11,0
	diesel	0	0	1 500 000	1 500 000	174 532	0	94 444	268 976	
	erotus	400 000	50 460	1 000 000	1 450 460	-126 071	13 022	-18 889	-131 938	
18	sähkö	800 000	62 640	6 000 000	6 862 640	120 801	15 878	188 340	325 020	9,5
	diesel	0	0	3 600 000	3 600 000	435 065	0	235 425	670 490	
	erotus	800 000	62 640	2 400 000	3 262 640	-314 264	15 878	-47 085	-345 471	
20	sähkö	400 000	57 420	1 000 000	1 457 420	17 231	14 654	26 864	58 749	> 30
	diesel	0	0	600 000	600 000	62 056	0	33 580	95 636	
	erotus	400 000	57 420	400 000	857 420	-44 825	14 654	-6 716	-36 887	
32A	sähkö	0	0	1 500 000	1 500 000	6 742	0	5 270	12 012	> 30
	diesel	0	0	900 000	900 000	24 283	0	6 588	30 871	
	erotus	0	0	600 000	600 000	-17 540	0	-1 318	-18 858	
88	sähkö	0	0	500 000	500 000	8 475	0	11 041	19 516	8,0
	diesel	0	0	300 000	300 000	30 522	0	13 801	44 323	
	erotus	0	0	200 000	200 000	-22 047	0	-2 760	-24 807	
Pkakola	sähkö	400 000	19 140	500 000	919 140	5 619	5 678	7 320	18 617	> 30
	diesel	0	0	300 000	300 000	20 236	0	9 150	29 386	
	erotus	400 000	19 140	200 000	619 140	-14 617	5 678	-1 830	-10 769	

Kustannuslaskelmien perusteella selvästi korkeimmat sähköbussiliikennöinnin hankintakustannukset ovat linjalla 18. Linjan 18 korkeat hankintakustannukset johtuvat kahden latauspisteen ja jopa 12 sähköbussin hankintatarpeesta. Sähköbussiliikennöinnin pilottivaiheessa hankintakustannukset olisivat kuitenkin selvästi alhaisemmat. Kahden latauspisteen ja yhden sähköbussin hankintakustannukset ovat noin 1 300 000 €.

Selvästi alhaisimmat sähköbussiliikennöinnin hankintakustannukset ovat linjalla 88. Alhaiset hankintakustannukset johtuvat vain yhden sähköbussin hankintatarpeesta sekä mahdollisuudesta käyttää yhteistä latauspistettä linjan 18 kanssa. Jos linjaa 18 ei tulla sähköistämään, linjan 88 hankintakustannukset kaksinkertaistuvat. Linjan 88 lisäksi alhaiset sähköbussiliikennöinnin hankintakustannukset ovat linjoilla 1S, 20, 32A ja PKakola. Kyseisillä linjoilla alhaiset hankintakustannukset johtuvat korkeintaan kolmen sähköbussin hankintatarpeesta sekä linjoilla 1S ja 32A mahdollisuudesta käyttää yhteistä latauspistettä linjojen 1H ja 12 kanssa.

Kustannuslaskelmien perusteella selvästi suurimmat sähköbussiliikennöinnin kustannussäästöt verrattuna dieselbussiliikennöintiin ovat linjalla 18. Linjan 18 sähköistaminen laskisi linjan vuosittaisia liikennöintikustannuksia lähes 350 000 €. Suurista liikennöintikustannussäästöistä johtuen linjan latausinfrastruktuurin ja sähköbussikaluston takaisinmaksuaika on vain 9,5 vuotta. Vielä tätäkin lyhyempään takaisinmaksu-aikaan ylittää linja 88. Jos linja 18 tullaan sähköistämään, niin sähköbussikaluston takaisinmaksuaika linjalla 88 on 8 vuotta.

Pienimmät sähköbussiliikennöinnin kustannussäästöt ovat linjoilla 1S, 32A ja PKakola. Pienet liikennöintikustannussäästöt johtuvat kaluston vähäisestä määrästä sekä lyhyestä päivittäisestä operointisäteestä. Linjojen 1S, 32A ja PKakola sähköistaminen laskisi linjojen vuotuisia liikennöintikustannuksia 10 000–20 000 €. Näin pienet liikennöintikustannussäästöt eivät takaa linjojen sähköistämisen taloudellista kannattavuutta. Linjoilla 1S ja 32A sähköbussikaluston takaisinmaksuaika on yli 30 vuotta ja linjalla PKakola latausinfrastruktuurin ja sähköbussikaluston takaisinmaksuaika yli 30 vuotta.

Sähköbussikaluston käyttöikä on 15 vuotta ja latausinfrastruktuurin 30 vuotta. Tällöin infran ja kaluston takaisinmaksuaika tulee olla alle 30 vuotta, jotta sähköbussiliikennöinti olisi taloudellisesti kannattavaa. Näin ollen sähköbussiliikennöinti ei ole taloudellisesti kannattavaa linjoilla 1S, 32A ja PKakola. Linjojen 1S, 32A ja PKakola lisäksi linjalla 20 on pitkä latausinfrastruktuurin ja sähköbussikaluston takaisinmaksuaika. Linjalla 20 latausinfrastruktuurin ja sähköbussikaluston takaisinmaksuaika on yli 30 vuotta. Sähköbussiliikennöinti ei näin ollen ole taloudellisesti kannattavaa kyseisellä linjalla.

Linjoilla 1H, 3, 30, 4, 40, 12 ja 13 sähköbussiliikennöinnin hankintakustannukset ovat 2 500 000–3 000 000 €. Sähköbussiliikennöinnin pilottivaiheessa hankintakustannukset olisivat kuitenkin selvästi alhaisemmat. Linjoilla 1H ja 12 kahden latauspisteen ja yhden sähköbussin hankintakustannukset ovat noin 1 300 000 € ja linjoilla 3, 30, 4, 40 ja 13 yhden latauspisteen ja yhden sähköbussin hankintakustannukset noin 900 000

€. Sähköbussiliikennöinnin vuosittaiset liikennöintikustannussäästöt linjoilla 1H, 3, 30, 4, 40, 12 ja 13 ovat 110 000-160 000 €. Latausinfrastruktuurin ja sähköbussikaluston takaisinmaksuajat ovat linjoilla 10–13 vuotta.

Potentiaalisten sähköbussilinjojen hankinta- ja liikennöintikustannusten perusteella sähköbussiliikennöinti ei ole taloudellisesti kannattavaa linjoilla 1S, 20, 32A ja PKakola. Sähköbussiliikennöinti on taloudellisesti kannattavaa kaikilla muilla tutkituilla joukkoliikennelinjoilla. Taloudellisesti kannattavinta sähköbussiliikennöinti on linjoilla 18 ja 88. Linjalla 18 latausinfrastruktuurin ja sähköbussikaluston takaisinmaksuaika on alle 10 vuotta. Linjan 88 taloudellinen kannattavuus on riippuvainen linjan 18 sähköistämisestä, mutta jos linja 18 sähköistetään, on linjalla 88 sähköbussikaluston takaisinmaksuaika 8 vuotta.

5.6 Ehdotus vaihtoehtoisista pilottilinjoista

Joukkoliikennelinjojen ominaisuuksien perusteella potentiaalisimpia sähköbussilinjoja ovat linjat 1H, 3, 30, 4, 40, 18 ja 32A. Kyseiset linjat saivat sähköbussiliikennöinnin ehdottomat kriteerit täyttävien joukkoliikennelinjojen vertailussa vähintään 75 % pisteistä ja ovat näin ollen seitsemän potentiaalisinta sähköbussilinjaa Turun seudulla. Sähköverkon kannalta latauspisteiden perustaminen on helpointa linjojen 4 ja 40 kääntöpaikalle, mutta kohtuullisella työllä latauspisteet pystytään perustamaan myös linjojen 3, 30, 18 ja 32A kääntöpaikoille. Taloudellisesti kannattavinta sähköbussiliikennöinti on linjalla 18. Linjan 32A sähköistäminen ei ole taloudellisesti kannattavaa.

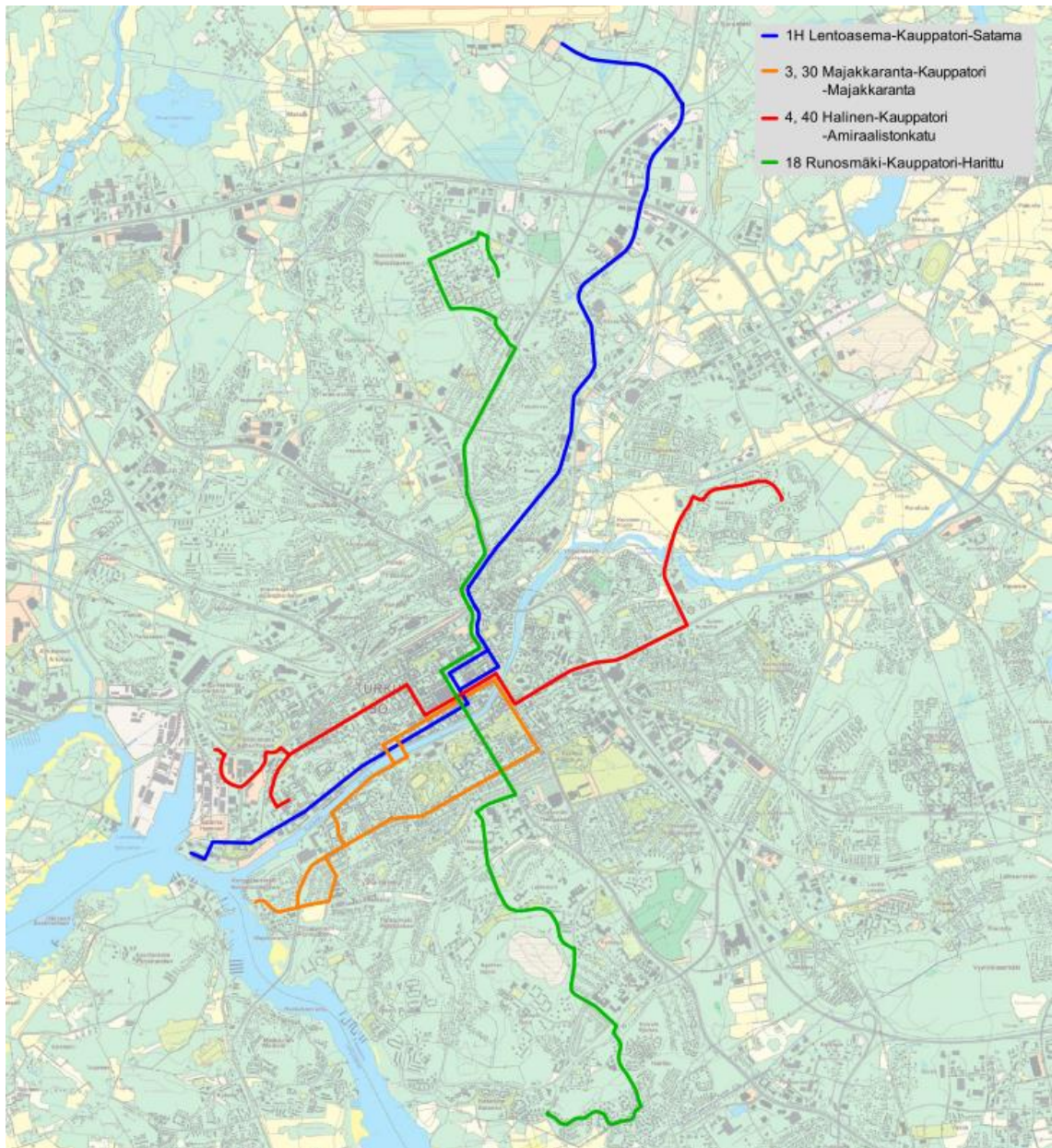
Linja 1H on kolmanneksi potentiaalisin sähköbussilinja, eikä linjan taloudellinen kannattavuus estä mahdollisuutta linjan sähköistämiseen. Linjan 1H latauspisteen perustaminen Sataman verkko-omistuskriittiselle alueelle vaatii kuitenkin linjan reitin ja kääntöpaikan sijainnin muuttamista tai sähköön ostamista Turun Satama Osakeyhtiöltä. Linjat 3, 30, 4, 40 ja 18 ovat kuuden potentiaalisimman sähköbussilinjan joukossa, eivätkä sähköverkko tai linjojen taloudellinen kannattavuus estä mahdollisuutta linjojen sähköistämiseen. Linja 32A on seitsemänneksi potentiaalisin sähköbussilinja, eikä sähköverkko estä mahdollisuutta linjan sähköistämiseen. Linjan 32A sähköistäminen ei kuitenkaan ole taloudellisesti kannattavaa.

Joukkoliikennelinjojen ominaisuuksien, sähköverkon sekä linjojen taloudellisen kannattavuuden perusteella ehdotetaan vaihtoehtoisiksi pilottilinjoiksi linjoja 1H, 3, 30, 4, 40 ja 18. Linjaa 1H ei jätetä vaihtoehtoisten pilottilinjojen ulkopuolelle sähköverkko-ongelmien takia, vaan mahdollisuus sähköön ostamiseen Turun Satama Osakeyhtiöltä selvitetään luvussa 6. Linja 32A jätetään vaihtoehtoisten pilottilinjojen ulkopuolelle linjan sähköistämisen taloudellisen kannattamattomuuden takia. Tarkemmat tiedot joukkoliikennelinjojen ominaisuuksista, sähköverkosta ja linjojen taloudellisesta kannattavuudesta löytyvät luvuista 5.3–5.5.

6 SÄHKÖBUSSIPILOTTI

6.1 Vaihtoehtoiset pilottilinjat

Vaihtoehtoisiksi pilottilinjoiksi ehdotetaan linjoja 1H, 3, 30, 4, 40 ja 18. Linja 1H on pitkä lähes kaikki joukkoliikenneterminaalit palveleva heilurilinja, linjat 3 ja 30 ovat keskustan ruutukaava-alueella liikennöiviä rengaslinjoja, linjat 4 ja 40 ovat lyhyitä keskustan läheisyydessä liikennöiviä heilurilinjoja ja linja 18 on pitkä erittäin tiheällä vuorovälillä liikennöivä heilurilinja. Linjoilla 1H ja 18 liikennöidään nykyään telibussein ja linjoilla 3, 30, 4 ja 40 liikennöidään 2-akselisella kalustolla. Kuvassa 26 on esitetty kaikki vaihtoehtoiset pilottilinjat kartalla.



Kuva 26 Vaihtoehtoiset pilottilinjat.

Linja 1H on 12,7 kilometriä pitkä heilurilinja, joka yhdistää Lentoaseman, linja-autoaseman, Kauppatorin ja Sataman. Turun matkakeskuksen valmistuttua myös rautatieasema sijoittuu linjan 1H varteen. Linja liikennöi arkisin 20 minuutin vuorovälillä ja pyhänä 35 minuutin vuorovälillä. Yhden linjasivun (12,7 km) ajoaika on 30–32 minuuttia. Arkipäivinä ja lauantaisin linjalla 1H on neljä autoa kierrossa ja pyhäpäivinä linjalla on kaksi autoa kierrossa. Kalustokierto on arkipäivinä ja lauantaisin 80 minuuttia ja pyhäpäivinä 70 minuuttia. (Kesäaikataulut; Toimintakertomus 2013)

Linjan 1H tasausaika Kauppatorilla on arkipäivinä ja lauantaisin Sataman suuntaan ajettaessa 4 minuuttia ja Lentoaseman suuntaan ajettaessa 3 minuuttia. Kääntöaika on arkipäivinä ja lauantaisin Satamassa 6 minuuttia ja Lentoasemalla 5 minuuttia. Tasausaika Kauppatorilla on pyhäpäivinä Sataman suuntaan ajettaessa 0 minuuttia ja Lentoaseman suuntaan ajettaessa 3 minuuttia. Kääntöaika on pyhäpäivinä Satamassa 3 minuuttia ja Lentoasemalla 2 minuuttia. Linjalla 1H kalustokohtainen operointisäde on arkipäivinä keskimäärin 356 km, lauantaisin keskimäärin 330 km ja pyhäpäivinä keskimäärin 406 km. Näin ollen linjalla 1H liikennöidään noin 477 630 km vuodessa. Kalustokohtainen operointisäde on arkipäivinä ja lauantaisin korkeintaan 356 km ja pyhäpäivinä korkeintaan 432 km. (Kesäaikataulut)

Linjat 3 ja 30 ovat 8,9 km pitkiä rengaslinjoja, jotka liikennöivät Kauppatorin ja Majakkarannan välillä. Linja 3 liikennöi rengaslinjaa myötäpäivään ja linja 30 vastapäivään. Linjat palvelevat Turun keskustan sisäistä liikennettä sekä keskustan eteläpuolisia asuinalueita, kuten Vähä-Heikkilää ja Korppolaismäkeä. Linjat liikennöivät arkisin 20 minuutin vuorovälillä ja pyhänä 40 minuutin vuorovälillä. Yhden kierron (8,9 km) ajoaika on 34 minuuttia. Arkipäivinä ja lauantaisin molemmilla linjoilla on kaksi autoa kierrossa ja pyhäpäivinä yksi auto kierrossa. Kalustokierto on jokaisena viikonpäivänä 40 minuuttia. (Kesäaikataulut; Opaskartta; Toimintakertomus 2013)

Linjojen 3 ja 30 tasausaika Kauppatorilla on 1 minuutti ja kääntöaika Majakkarannassa 5 minuuttia. Linjojen 3 ja 30 kalustokohtainen operointisäde on arkipäivinä keskimäärin 214 km, lauantaisin keskimäärin 187 km ja pyhäpäivinä keskimäärin 231 km. Näin ollen linjoilla 3 ja 30 liikennöidään yhteensä 283 180 km vuodessa. Kalustokohtainen operointisäde on linjoilla 3 ja 30 arkipäivinä ja lauantaisin korkeintaan 223 km ja pyhäpäivinä korkeintaan 231 km. (Kesäaikataulut)

Linja 4 on 8,2 km pitkä heilurilinja ja linja 40 8,7 km pitkä heilurilinja. Linjat 4 ja 40 liikennöivät samaa reittiä Halisista Kauppatorin kautta Port Arthuriin, mutta erkanevat sen jälkeen. Port Arthurista linja 4 jatkaa matkaansa Amiraalistonkadun kääntöpaikalle ja linja 40 Huolintakadun kääntöpaikalle. Linjojen aikataulut on porrastettu niin, että ne muodostavat arkisin 15 minuutin ja pyhänä 30 minuutin vuorovälin Halisten ja Port Arthurin väliselle reitille. Yhden linjasivun (8,2–8,7 km) ajoaika on 30 minuuttia. Linjoilla 4 ja 40 on arkipäivinä yhteensä viisi autoa kierrossa. Linjalla 4 on lauantaisin 4 autoa kierrossa ja pyhäpäivinä 2 autoa kierrossa. Linja 40 ei liikennöi lauantaisin eikä pyhäpäivinä. Kalustokierto on arkipäivinä 75 minuuttia, lauantaisin 80 minuuttia ja pyhäpäivinä 60 minuuttia. (Kesäaikataulut; Opaskartta; Toimintakertomus 2013)

Linjojen 4 ja 40 tasausaika Kauppatorilla on arkipäivinä ja lauantaisin Amiraalistonkadun suuntaan ajettaessa 3 minuuttia ja Halisten suuntaan ajettaessa 2 minuuttia. Kääntöaika on Amiraalistonkadulla arkipäivinä 2 minuuttia ja lauantaisin 7 minuuttia. Kääntöaika on arkipäivinä ja lauantaisin Halisissa 8 minuuttia. Pyhäpäivinä linjalla ei ole tasausaikaa Kauppatorilla ja kääntöaika sekä Amiraalistonkadulla että Halisissa on 0 minuuttia. Linjojen 4 ja 40 kalustokohtainen operointisäde on arkipäivinä keskimäärin 218 km, lauantaisin keskimäärin 205 km ja pyhäpäivinä keskimäärin 279 km. Näin ollen linjoilla 4 ja 40 liikennöidään yhteensä 332 990 km vuodessa. Kalustokohtainen operointisäde on linjoilla 4 ja 40 arkipäivinä korkeintaan 261 km, lauantaisin korkeintaan 230 km ja pyhäpäivinä korkeintaan 279 km. (Kesäaikataulut)

Linja 18 on 13,4 km pitkä heilurilinja. Linja liikennöi Runosmäen ja Haritun välillä arkisin 7,5 minuutin vuorovälillä ja pyhänä 20 minuutin vuorovälillä. Kesällä 22.4.–21.9. linja liikennöi arkisin 10 minuutin vuorovälillä. Yhden linjasivun (13,4 km) ajoaika on 38 minuuttia. Talviarkipäivinä linjalla on 12 autoa kierrossa, kesäarkipäivinä linjalla on yhdeksän autoa kierrossa, lauantaisin linjalla on kuusi autoa kierrossa ja pyhäpäivinä linjalla on neljä autoa kierrossa. Kalustokierto on arkipäivinä ja lauantaisin 90 minuuttia ja pyhäpäivinä 80 minuuttia. (Kesäaikataulut; Toimintakertomus 2013; Turun kaupunki 2013 b)

Linjan 18 tasausaika Kauppatorilla on talviarkipäivinä 3 minuuttia ja kesäarkipäivinä ja lauantaisin 2 minuuttia. Kääntöaika sekä Haritussa että Runosmäessä on talviarkipäivinä 4 minuuttia ja kesäarkipäivinä ja lauantaisin 5 minuuttia. Tasausaika on pyhäpäivinä Kauppatorilla 0 minuuttia ja kääntöaika sekä Haritussa että Runosmäessä 2 minuuttia. Linjan 18 kalustokohtainen operointisäde on talviarkipäivinä keskimäärin 268 km, kesäarkipäivinä keskimäärin 295 km, lauantaisin keskimäärin 308 km ja pyhäpäivinä keskimäärin 348 km. Näin ollen linjalla 18 liikennöidään noin 930 990 km vuodessa. Kalustokohtainen operointisäde on linjalla 18 arkipäivinä ja lauantaisin korkeintaan 348 km ja pyhäpäivinä korkeintaan 375 km. (Kesäaikataulut; Turun kaupunki 2013 b) Taulukossa 23 on esitetty vaihtoehtoisten pilottilinjojen 1H, 3, 30, 4, 40 ja 18 linjakohtaiset ominaisuudet.

Taulukko 23 *Vaihtoehtoisten pilottilinjojen linjakohtaiset ominaisuudet. (Kesäaikataulut; Opaskartta; Toimintakertomus 2013; Turun kaupunki 2013 b)*

Linja		1H	3, 30	4, 40	18
Linjatyyppi		Heilurilinja	Rengaslinja	Heilurilinja	Heilurilinja
Linjapituus (km)		12,7	8,9	Linja 4: 8,2 Linja 40: 8,7	13,4
Ajoaika (min)		30-32	34	30	38
Vuoroväli (min)	arki	20	20	15	Talvi: 7,5 Kesä: 10
	pyhä	35	40	30	20

Autojen määrä	ma-pe	4	4	5	Talvi: 12 Kesä: 9
	la	4	4	4	6
	pyhä	2	2	2	4
Tasausaika kauppatorilla (min)	ma-pe	Satama: 4 Lentoasema: 3	1	Amiraalistonkatu: 3 Halinen: 2	Talvi: 3 Kesä: 2
	la	Satama: 4 Lentoasema: 3	1	Amiraalistonkatu: 3 Halinen: 2	2
	pyhä	Satama: 0 Lentoasema: 3	1	0	0
Kääntöaika	ma-pe	Satama: 6 Lentoasema: 5	5	Amiraalistonkatu: 2 Halinen: 8	Talvi: 4 + 4 Kesä: 5 + 5
	la	Satama: 6 Lentoasema: 5	5	Amiraalistonkatu: 7 Halinen: 8	5 + 5
	pyhä	Satama: 3 Lentoasema: 2	5	0 + 0	2 + 2
Operointisäde (km) keskiarvo	ma-pe	356	214	218	Talvi: 268 Kesä: 295
	la	330	187	205	308
	pyhä	406	231	279	348
Operointisäde (km) korkeintaan	ma-pe	356	223	261	348
	la	356	223	230	348
	pyhä	432	231	279	375
Liikennöintimäärä (km) / vuosi		477 630	283 180	332 990	930 990

Vaihtoehtoisten pilottilinjojen linjanopeudet vaihtelevat suuresti. Linjalla 1H linjanopeus on kaikkein suurin ja linjoilla 3 ja 30 kaikkein pienin. Linjalla 1H linjanopeus on noin 25 km/h, linjoilla 3 ja 30 noin 16 km/h, linjoilla 4 ja 40 noin 17 km/h ja linjalla 18 noin 21 km/h. Suuri linjanopeus on mahdollinen silloin kun linja liikennöi keskustan ulkopuolella, linjan pysäkkiväli on harva ja linjan matkustajamäärät eivät ole suuret. Alhainen linjanopeus taas johtuu liikennöinnistä keskustan alueella. Keskustan alueella liikennöitäessä liikenne on nykivää ja pysähdyksiä ja jarruttelua on paljon. Keskustassa myös sallitut ajonopeudet ovat pieniä. Tiheä pysäkkiväli ja suuret matkustajamäärät laskevat myös linjanopeutta.

Vaihtoehtoiset pilottilinjat kuuluvat kolmeen eri palvelutasoluokkaan. Paras palvelutaso on linjalla 18 ja huonoin linjoilla 3 ja 30. Linja 18 kuuluu palvelutasoluokkaan II, linjat 1H, 4 ja 40 kuuluvat palvelutasoluokkaan III ja linjat 3 ja 30 palvelutasoluokkaan IV. Palvelutasoluokassa II joukkoliikenne tarjoaa kilpailukykyisen vaihtoehdon henkilöauton käytölle ja lähes kaikki matkat on mahdollista tehdä joukkoliikenteellä. Palvelutasoluokassa III joukkoliikenne tarjoaa houkuttelevan vaihtoehdon henkilöauton käytölle ja palvelutasoluokassa IV joukkoliikenne tarjoaa harkitsemisenarvoisen ja käyttökelpoisen vaihtoehdon useimmille matkoille. Palvelutasoluokissa III ja IV asiakas joutuu

jonkin verran sovittamaan ajankäyttöään joukkoliikenteen aikataulujen mukaisesti. (Palvelutasomäärittely 2011)

Vaihtoehtoisten pilottilinjojen vuosittainen liikennöintimäärä vaikuttaa merkittävästi sekä kaluston että latauspisteiden käyttöasteeseen. Liikennöintimäärä riippuu päivittäisestä operointisäteestä ja linjan kalustomäärästä. Lyhyin päivittäinen operointisäde on linjoilla 3 ja 30 ja pisin linjalla 1H. Vähiten kalustoa on linjoilla 1H, 3 ja 30 ja selvästi eniten linjalla 18. Suuresta kalustomäärästä johtuen linjan 18 vuosittainen liikennöintimäärä on selvästi suurin. Linjalla 18 liikennöidään noin 930 990 km vuodessa. Linjan 18 liikennöintimäärä on kolminkertainen linjojen 3, 30, 4 ja 40 liikennöintimäärän verrattuna. Linjalla 1H on myös pitkästä päivittäisestä operointisäteestä johtuen selvästi linjoja 3, 30, 4 ja 40 suurempi vuosittainen liikennöintimäärä. Linjalla 1H liikennöidään noin 477 630 km vuodessa.

6.2 Vaihtoehtoisten pilottilinjojen sähköistäminen yhdistelmä-latauskonseptia käyttäen

Vaihtoehtoiset pilottilinjat suositellaan sähköistettäväksi yhdistelmälatauskonseptia käyttäen niin, että sähköbussuja ladataan operoinnin aikana linjojen kääntöpaikoilla ja yön aikana varikolla. Operoinnin aikaan pikalataukseen käytetään virroitinlatausta ja varikkolataukseen kaapelilatausta. Heilurilinjoille 1H ja 18 tarvitaan kaksi latauspistettä, linjoille 3 ja 30 yksi yhteinen latauspiste ja linjoille 4 ja 40 yksi yhteinen latauspiste. Linjoilla 3, 30, 4, 40 ja 18 sähkönsyöttö tuleville latauspisteille mahdollistetaan olemassa olevilta muuntamoilta ja latauspisteet voidaan perustaa linjojen nykyisille kääntöpaikoille. Linjan 1H latauspisteiden perustaminen tuottaa kuitenkin pieniä ongelmia.

Lataustaajuus määräytyy vaihtoehtoisten pilottilinjojen linjapituuden sekä latauspisteiden määrän perusteella. Linjojen 1H, 3, 30 ja 18 kaikille kääntöpaikoille perustetaan latauspiste ja tästä johtuen linjojen lataustaajuus määräytyy suoraan linjapituuden perusteella. Linjojen 4 ja 40 kaikille kääntöpaikoille ei perusteta latauspistettä ja tästä johtuen linjojen lataustaajuus on kaksinkertainen linjojen linjapituuteen verrattuna.

Vaihtoehtoisten pilottilinjojen operoinnin aikainen latausaika kääntöpaikoilla lasketaan linjojen tasaus- ja kääntöaikojen perusteella siten, että tasausajat Kauppatorilla minimoidaan. Tasausaikojen minimointi Kauppatorilla on toivottavaa mahdollisimman pitkien latausaikojen turvaamiseksi sekä Kauppatorin ruuhkautumisen vähentämiseksi. Linjoilla 1H, 3 ja 30 jokaisen viikonpäivän latausaika perustuu linjojen nykyiseen kalustokierto. Linjoilla 4, 40 ja 18 arkipäivien ja lauantain latausajat perustuvat linjojen nykyiseen kalustokierto, mutta pyhäpäivien latausajat on laskettu lisäauton mahdollistaman kalustokierron mukaan. Linjojen 4, 40 ja 18 nykyinen kalustokierto ei mahdollista sähköbussioperointia pyhäpäivinä.

Operoinnin aikaista latausaikaa laskettaessa on myös huomioitava pikalatauksen aloittamiseen ja lopettamiseen kuluva aika. Nykyisellä virroitinlataustekniikalla tämä aika on korkeintaan 30 sekuntia ja tekniikkaa kehitetään jatkuvasti ajan minimoimiseksi.

si. Vaihtoehtoiset pilottilinjat on sähköistetty siten, että tasausaika Kauppatorilla on arkipäivinä ja lauantaisin minimoitu 30–90 sekuntiin ja kyseisiin aikoihin on lisätty pikalatauksen aloittamiseen ja lopettamiseen kuluva aika (30 sekuntia). Näin ollen latausaika vaihtoehtoisilla pilottilinjoilla on arkipäivinä ja lauantaisin laskettu vähentämällä kalustokierron mukaisesta yhteenlasketusta kääntö- ja tasausajasta 1-2 minuuttia. Pyhäpäivinä ajoajan on oletettu olevan ilmoitettua lyhyempi ja näin ollen vähennyksiä ei ole tehty.

Operoinnin aikainen pikalatausteho riippuu päivittäisestä operointisäteilystä, lataustaajuudesta, latausajasta, akkukapasiteetista sekä käytettävästä akkutyypistä. Akkutyypin vaikutus operoinnin aikaan pikalataustehoon perustuu akkutyypin tehotehokkuuteen. LTO-akkujen tehotehokkuus on LFP-akkujen tehotehokkuutta suurempi. Näin ollen LTO-akkuja pystytään lataamaan suuremmalla teholla kuin LFP-akkuja. LFP-akkuja pystytään lataamaan 1C arvolla ja LTO-akkuja 4C arvolla. Vaihtoehtoiset pilottilinjat on kuitenkin mitoitettu ladattavaksi korkeintaan 2C arvolla. Vaihtoehtoisilla pilottilinjoilla käytetään 135–267 kW pikalataustehoja.

Kaapelilataus mahdollistaa jopa 90 kW varikkolataustehon käytön. Tässä diplomityössä vaihtoehtoiset pilottilinjat on kuitenkin mitoitettu siten, että varikolla käytetään korkeintaan 50 kW lataustehoa. Tällöin kaapelilataus voidaan suorittaa jakeluverkkoon liitetyn teollisuuskabelin avulla. Korkeintaan 50 kW varikkolataustehoa käytettäessä vaihtoehtoisten pilottilinjojen varikkolatausajat vaihtelevat 1-3 tunnin välillä. Varikkolataustehoa voidaan laskea edelleen sallimalla entistä pidemmät varikkolatausajat. Varikkolataus voidaan myös poistaa kokonaan. Tällöin sähköbussuja ladataan ennen päivän ensimmäistä vuoroa sekä päivän viimeisen vuoron jälkeen pikalatauspisteellä LTO-akkuja käytettäessä 15 minuuttia ja LFP-akkuja käytettäessä 30 minuuttia.

Riippumatta siitä ladataanko sähköbussuja yön aikana varikolla vai ei, on niitä joka tapauksessa ladattava päivän viimeisen vuoron jälkeen pikalatauspisteellä siirtoajon mahdollistamiseksi. Se kuinka kauan sähköbussuja tulee ladata pikalatauspisteellä päivän viimeisen vuoron jälkeen, riippuu siirtoajon pituudesta eli matkasta linjan kääntöpaikalta varikolle. Jos sähköbussuja ei ladata yön aikana varikolla, on niitä ladattava myös ennen päivän ensimmäistä vuoroa pikalatauspisteellä, jotta akkujen varaustaso on vähintään 80 % linjalle lähdettäessä. Jos sähköbussuja ei haluta ladata päivän viimeisen vuoron jälkeen pikalatauspisteellä, on sähköbussien akkukapasiteettia kasvatettava siirtoajon mahdollistamiseksi.

Sähköbussikaluston akkukapasiteetti riippuu päivittäisestä operointisäteilystä, lataustaajuudesta, latausajasta, pikalataustehosta, linjapituudesta sekä käytettävästä akkutyypistä. Vaihtoehtoisten pilottilinjojen yhdistelmälatauskonsepti on mitoitettu siten, että sähköbussikaluston akkukapasiteetista käytetään sähköbussiliikennöinnin aikana korkeintaan 50 %. Akkukapasiteetin arvot on optimoitu mahdollisimman pieniksi käyttämällä mahdollisimman suurta akkutyypille sallittua pikalataustehoa. Sähköbussikaluston akkukapasiteetti on aina vähintään kaksi kertaa vaihtoehtoisen pilottilinjan lataustaajuus kertaa sähkönkulutus. Sähkönkulutuksena käytetään 1,5 kWh/km.

Vaihtoehtoisten pilottilinjojen purku-lataussyklin syvyys on laskettu linjan suurimman liikennöinnin aikaisen purku- tai lataussyklin perusteella. Linjalla 1H suurimman syklin muodostaa arkipäivinä ja lauantaisin 8 minuutin lataus ja pyhäpäivinä 5 minuutin lataus. Linjoilla 3, 30, 4, 40 ja 18 suurimman syklin muodostaa latauspisteiden välinen sähkönkulutus. Purku-lataussyklien määrä on laskettu päivittäisen operointisäteen ja lataustaajuuden perusteella. Purku-lataussyklien syvyys ja määrä on merkattu taulukoon 24. Kyseiset purku-lataussyklin syvyydet eivät kuitenkaan ole toimineet mitoittavana tekijänä akkujen elinikää arvioitaessa.

Akkujen elinikää arvioitaessa mitoittavana tekijänä on toiminut vaihtoehtoisten pilottilinjojen suurin päivittäinen purku- tai lataussykli. Kaikilla vaihtoehtoisilla pilottilinjoilla suurin päivittäinen sykli on päivän viimeisen vuoron jälkeen suoritettava lataus pikalatauspisteellä tai varikolla. Vaihtoehtoisten pilottilinjojen akkukapasiteetista käytetään päivän aikana 50 % ja näin ollen akkujen elinikää laskettaessa purku-lataussyklin syvyys on 50 %. Akkujen elinikää on arvioitu karkeasti purku-lataussyklin syvyyden (50 %) mahdollistaman syklikeston (kuva 8) perusteella. Taulukossa 24 on esitetty vaihtoehtoisten pilottilinjojen sähköistämiseen tarvittavat tiedot. Vaihtoehtoisten pilottilinjojen sähköistäminen on esitetty linjakohtaisesti luvuissa 6.2.1.–6.2.4.

Taulukko 24 Vaihtoehtoisten pilottilinjojen sähköistämiseen tarvittavat tiedot.

Linja		1H	3, 30	4, 40	18
Latauspisteiden sijainti		LENTOASEMA: Lentorahdintie	MAJAKKARANTA : Kölikatu	HALINEN: Paavinkatu	RUNOSMÄKI: Varusmestarintie
		SATAMA: Ensimmäinen poikkikatu			HARITTU: Meriläistentie
Lataustaajuus (km)		12,7	8,9	ma-pe: 17,4 la-su: 16,4	13,4
Latausaika (min)	ma-pe	Satama: 8 Lentoasema: 6	5	9	6 + 6
	la	Satama: 8 Lentoasema: 6	5	9	6 + 6
	pyhä	Satama: 3 Lentoasema: 5	5	15 (3 autoa)	12 + 12 (5 autoa)
Pikalataus-teho (kW)	ma-pe	LTO: 158 LFP: 147	LTO: 149 LFP: 135	LTO: 167 LFP: 151	LTO: 190 LFP: 175
	la	LTO: 158 LFP: 147	LTO: 149 LFP: 135	LTO: 157 LFP: 141	LTO: 190 LFP: 175
	pyhä	LTO: 267 LFP: 242	LTO: 149 LFP: 135	LTO: 98 LFP: 91	LTO: 100 LFP: 95
Varikkolataus-teho (kW)	ma-pe	LTO: 40 (1 h) LFP: 35 (2 h)	LTO: 40 (1 h) LFP: 35 (2 h)	LTO: 40 (1 h) LFP: 35 (2 h)	LTO: 50 (1 h) LFP: 45 (2 h)
	la	LTO: 40 (1 h) LFP: 35 (2 h)	LTO: 40 (1 h) LFP: 35 (2 h)	LTO: 40 (1 h) LFP: 35 (2 h)	LTO: 50 (1 h) LFP: 45 (2 h)
	pyhä	LTO: 35 (2 h) LFP: 40 (3 h)	LTO: 40 (1 h) LFP: 35 (2 h)	LTO: 25 (1 h) LFP: 45 (1 h)	LTO: 25 (1 h) LFP: 50 (1 h)

Akkukapasiteetti (kWh)	ma-pe	LTO: 79 LFP: 147	LTO: 75 LFP: 135	LTO: 84 LFP: 151	LTO: 95 LFP: 175
	la	LTO: 79 LFP: 147	LTO: 75 LFP: 135	LTO: 79 LFP: 141	LTO: 95 LFP: 175
	pyhä	LTO: 134 LFP: 242	LTO: 75 LFP: 135	LTO: 52 LFP: 91	LTO: 50 LFP: 95
Purku-lataussyklin syvyys (%)	ma-pe	LTO: 30 LFP: 15	LTO: 20 LFP: 10	LTO: 30 LFP: 20	LTO: 20 LFP: 10
	la	LTO: 30 LFP: 15	LTO: 20 LFP: 10	LTO: 30 LFP: 20	LTO: 20 LFP: 10
	pyhä	LTO: 20 LFP: 10	LTO: 20 LFP: 10	LTO: 50 LFP: 30	LTO: 40 LFP: 20
Purku-lataussykli määrä	ma-pe	28	26	15	26
	la	28	26	14	26
	pyhä	34	26	12	22
Akkujen elinikä (a)		LTO: > 15 LFP: 5	LTO: > 15 LFP: 5	LTO: > 15 LFP: 5	LTO: > 15 LFP: 5

Ekspontiaalista syklikeston kasvukäyrää (kuva 8) käytettäessä LTO-akkujen elinikä on yli 15 vuotta ja LFP-akkujen elinikä noin 5 vuotta. Tällöin LTO-akkuja ei tarvitse vaihtaa sähköbussikaluston eliniän aikana, mutta LFP-akut tulee vaihtaa kaksi kertaa. Luvussa 4.2 kuitenkin mainittiin, ettei purku-lataussyklin syvyyden vaikutuksesta akun syklikeston olla alan asiantuntijoiden keskuudessa täysin yksimielisiä. Jos akun syklikeston kasvu suhteessa purku-lataussyklin syvyyteen on lineaarista tässä diplomityössä oletetun eksponentiaalisen kasvun sijaan, laskee LTO-akun elinikä 7,5 vuoteen ja LFP-akun elinikä 2,5 vuoteen. Tällöin LTO-akut tulee vaihtaa kerran ja LFP-akut 5 kertaa sähköbussikaluston eliniän aikana. Luvussa 6.3 on tarkasteltu akkujen eliniän vaikutusta vaihtoehtoisten pilottilinjojen taloudelliseen kannattavuuteen.

6.2.1. Linja 1H

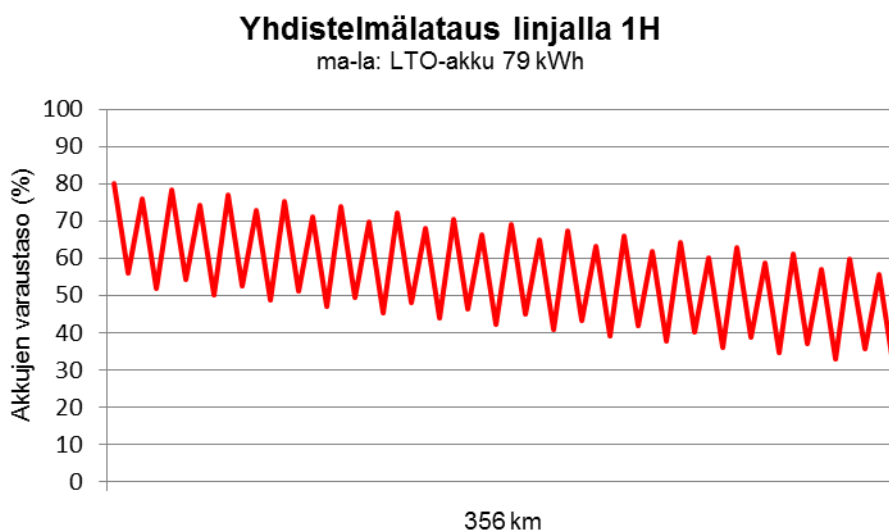
Linjan 1H sähköistäminen yhdistelmälatauskonseptia käyttäen vaatii latauspisteen perustamista molemmille linjan kääntöpaikoille. Toinen latauspisteistä sijaitsee Lentoasemalla ja toinen Satamassa. Lentoaseman latauspistettä varten on rakennettava uusi muuntamo, jonka sijainti määrittää tulevan latauspisteen paikan. Näin ollen Lentoaseman latauspiste ei voi sijaita linjan nykyisellä kääntöpaikalla, vaan latauspiste tulisi todennäköisesti sijaitsemaan Lentorahdintiellä. Sataman kääntöpaikan läheisyydessä ei ole Turku Energian omistamia muuntamoja, jotka mahdollistaisivat sähkönsyötön tulevalle latauspisteelle. Latauspisteen perustaminen Satamaan on kuitenkin mahdollista (Seppo Pohjanpalo 2014). Tällöin sähkönsyöttö latauspisteelle mahdollistetaan Turun Satama Osakeyhtiön omistamalta muuntamolta.

Linjalla 1H päivittäinen operointisäde on arkipäivinä ja lauantaisin korkeintaan 356 km ja pyhäpäivinä korkeintaan 432 km. Lataustaajuus on jokaisena viikonpäivänä 12,7 km. Minimoitaessa tasausajat Kauppatorilla on latausaika arkipäivinä ja lauantaisin Sa-

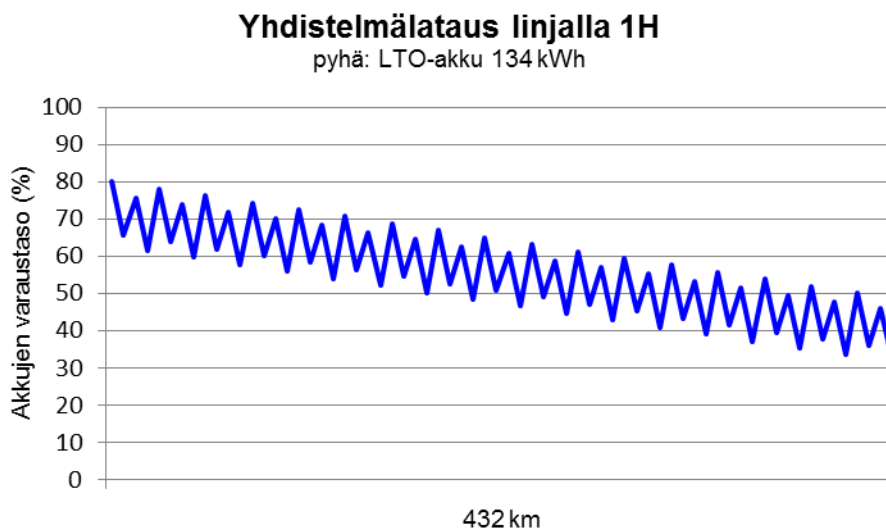
tamassa 8 minuuttia ja Lentoasemalla 6 minuuttia. Tällöin tasausaika Kauppatorilla on 90 sekuntia. Tasausaika linjalla 1H on pitkä, koska on oletettavaa, että linjalla on paljon matkustajia, jotka maksavat joukkoliikennematkan käteisellä ja joilla on paljon tavaraa mukanaan. Latausaika on pyhäpäivinä Satamassa 3 minuuttia ja Lentoasemalla 5 minuuttia. Pyhäpäivinä Kauppatorilla ei ole tasausaikaa.

Pyhäpäivien pidemmästä päivittäisestä operointisäteestä sekä lyhemmistä latausajoista johtuen operoinnin aikaisen pikalataustehon sekä akkukapasiteetin tarve on pyhäpäivinä huomattavasti suurempi kuin arkipäivinä ja lauantaisin. Arkipäivinä ja lauantaisin operoinnin aikainen pikalatausteho on LTO-akkua (79 kWh) käytettäessä 158 kW ja LFP-akkua (147 kWh) käytettäessä 147 kW. Pyhäpäivinä operoinnin aikainen pikalatausteho on LTO-akkua (134 kWh) käytettäessä 267 kW ja LFP-akkua (242 kWh) käytettäessä 242 kW. Varikkolatausteho on arkipäivinä ja lauantaisin LTO-akkua käytettäessä noin 40 kW (1 h) ja LFP-akkua käytettäessä noin 35 kW (2 h). Varikkolatausteho on pyhäpäivinä LTO-akkua käytettäessä noin 35 kW (2 h) ja LFP-akkua käytettäessä noin 40 kW (3 h).

Yhdistelmälatauskonseptin käyttö edellä mainittuja lataustehoja ja akkukapasiteetteja käyttäen edellyttää linjalla 1H arkipäivinä ja lauantaisin keskimäärin 7 minuutin latausta 12,7 km välein ja pyhäpäivinä keskimäärin 4 minuutin latausta 12,7 km välein. Jos linjan suunnitellut latausajat eivät toteudu, on linjalla 1H käytettäviä pikalataustehoja kasvatettava. Pikalataustehoa kasvatettaessa on myös huomioitava suuremman akkukapasiteetin tarve. Kuvissa 27 ja 28 on esitetty yhdistelmälataus linjalla 1H. Kuvassa 27 on esitetty akkujen varaustason vaihtelu arkipäivinä ja lauantaisin LTO-akkua käytettäessä ja kuvassa 28 akkujen varaustason vaihtelu pyhäpäivinä LTO-akkua käytettäessä.



Kuva 27 Yhdistelmälataus linjalla 1H. Akkujen varaustason vaihtelu arkipäivinä ja lauantaisin LTO-akkua käytettäessä.



Kuva 28 Yhdistelmä lataus linjalla 1H. Akkujen varaustason vaihtelu pyhäpäivinä LTO-akkuä käytettäessä.

Linjalla 1H purku-lataussyklin syvyys on arkipäivinä ja lauantaisin LTO-akkuä käytettäessä noin 30 % ja LFP-akkuä käytettäessä noin 15 %. Arkipäivinä ja lauantaisin purku-lataussyklejä on korkeintaan 28. Purku-lataussyklin syvyys on pyhäpäivinä LTO-akkuä käytettäessä noin 20 % ja LFP-akkuä käytettäessä noin 10 %. Pyhäpäivinä purku-lataussyklejä on korkeintaan 34. Päivän suurimman (50 %) lataussyklin mukaan arvioitaessa LTO-akkujen elinikä on yli 15 vuotta ja LFP-akkujen elinikä noin 5 vuotta.

Nykyään linjalla 1H liikennöidään telibussein ja tästä johtuen linjan sähköistäminen pienentää linjan matkustajakapasiteettia. Linjalla 1H latauspisteiden perustaminen tuottaa myös pieniä ongelmia. Lentoaseman latauspisteen sijoittaminen Lentorahdintielle voi tehdä mahdottomaksi 6 minuutin latauksen Lentoasemalla, mikä aiheuttaa merkittäviä muutoksia linjan akkukapasiteettiin ja pikalataustehoon. Latausajan lyheneminen 1 minuutilla lisää akkukapasiteetin tarvetta vähintään 7 kilowattitunnilla ja pikalataustehon arvoa noin 12 kilowatilla. Muutokset akkukapasiteetissa ja pikalataustehossa vaikuttavat linjan taloudelliseen kannattavuuteen.

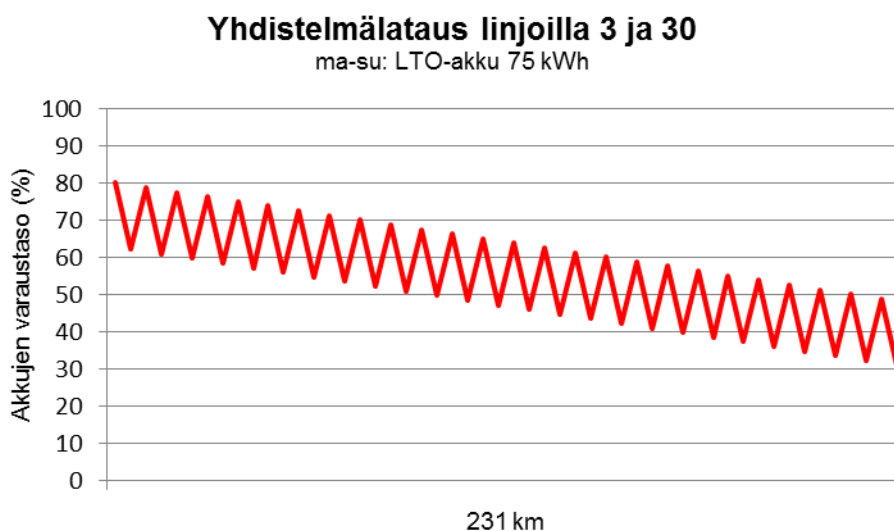
Linjalla 1H pyhäpäivien sähköbussiliikennöinti vaatii huomattavasti suurempaa pikalataustehoa ja akkukapasiteettia kuin arkipäivien ja lauantain sähköbussiliikennöinti. Sähköbussiliikennöinti viikon jokaisena päivänä linjalla 1H voidaan mahdollistaa mitoittamalla sähköbussikalusto ja latausinfrastruktuuri pyhäpäivien yhdistelmä latauskonseptin mukaisesti tai muuttamalla linjan kalustokiertoa pyhäpäivinä. Linjan kalustokiertoa voidaan muuttaa linjan vuoroväliä harventamalla tai ottamalla linjalle lisäauto kiertoon pyhäpäivinä. Linjan kalustokierron muuttaminen pyhäpäivinä mahdollistaa sähköbussikaluston ja latausinfrastruktuurin mitoittamisen arkipäivien ja lauantain yhdistelmä latauskonseptin mukaisesti.

6.2.2. Linjat 3 ja 30

Linjojen 3 ja 30 sähköistäminen yhdistelmälatauskonseptia käyttäen vaatii latauspisteen perustamista linjojen yhteiselle kääntöpaikalle Majakkarantaan. Linjojen nykyisen kääntöpaikan välittömässä läheisyydessä ei ole muuntamoita, mutta sähkönsyöttö latauspisteelle on kuitenkin mahdollistettavissa ongelmitta. Sähkönsyöttö tulevalle latauspisteelle mahdollistetaan olemassa olevalta muuntamolalta ja tätä varten Kölikatua pitkin on kaivettava noin 170 metriä uutta kaapelia.

Linjoilla 3 ja 30 päivittäinen operointisäde on arkipäivinä ja lauantaisin korkeintaan 223 km ja pyhäpäivinä korkeintaan 231 km. Lataustaajuus on jokaisena viikonpäivänä 8,9 km. Minimoitaessa tasausajat Kauppatorilla on latausaika Majakkarannassa jokaisena viikonpäivänä 5 minuuttia. Tällöin tasausaika Kauppatorilla on 30 sekuntia. Linjoilla 3 ja 30 pystytään käyttämään samaa pikalataustehoa ja akkukapasiteettia jokaisena viikonpäivänä. Sähköbussiliikennöinti linjoilla mitoitetaan pyhäpäivien yhdistelmälatauskonseptin mukaisesti. Operoinnin aikainen pikalatausteho on LTO-akkua (75 kWh) käytettäessä 149 kW ja LFP-akkua (135 kWh) käytettäessä 135 kW. Varikkolatausteho on LTO-akkua käytettäessä noin 40 kW (1 h) ja LFP-akkua käytettäessä noin 35 kW (2 h).

Yhdistelmälatauskonseptin käyttö edellä mainittuja lataustehoja ja akkukapasiteetteja käyttäen edellyttää linjoilla 3 ja 30 jokaisena viikonpäivänä vähintään 5 minuutin latausta 8,9 km välein. Jos linjojen suunnitellut latausajat eivät toteudu, on linjoilla 3 ja 30 käytettäviä pikalataustehoja kasvatettava. Pikalataustehoa kasvatettaessa on myös huomioitava suuremman akkukapasiteetin tarve. Kuvassa 29 on esitetty yhdistelmälataus linjoilla 3 ja 30 LTO-akkua käytettäessä.



Kuva 29 Yhdistelmälataus linjoilla 3 ja 30 LTO-akkua käytettäessä.

Linjoilla 3 ja 30 purku-lataussyklin syvyys on LTO-akkua käytettäessä noin 20 % ja LFP-akkua käytettäessä noin 10 %. Purku-lataussyklejä on viikon jokaisena päivänä

korkeintaan 26. Päivän suurimman (50 %) lataussyklin mukaan arvioitaessa LTO-akkujen elinikä on yli 15 vuotta ja LFP-akkujen elinikä noin 5 vuotta. Linjojen 3 ja 30 sähköistämistä helpottaa päivästä toiseen samana pysyvä kalustokierto, operointisäde, lataustaajuus ja latausaika. Linjat 3 ja 30 voidaan sähköistää hyvin nopealla aikataululla ja linjoilla voidaan liikennöidä sähköbusssein viikon jokaisena päivänä.

6.2.3 Linjat 4 ja 40

Linjojen 4 ja 40 sähköistäminen yhdistelmälatauskonseptia käyttäen vaatii latauspisteen perustamista linjojen yhteiselle kääntöpaikalle Halisiin. Linjoilla 4 ja 40 olisi mahdollisuus latauspisteiden perustamiseen myös Amiraalistonkadun ja Huolintakadun kääntöpaikoille, mutta kolmen latauspisteen perustaminen lyhyelle linjalle, jossa vuosittainen liikennöintimäärä on suhteellisen pieni, ei ole taloudellisesti kannattavaa. Tämän takia linjoille perustetaan vain yksi latauspiste. Halisten kääntöpaikan sijainti on erinomainen latauspisteen perustamista varten. Turku Energian muuntamo sijaitsee Hehtokadun ja Paavinkadun kulmassa aivan linjojen 4 ja 40 kääntöpaikan läheisyydessä. Sähkönsyöttö tulevalle latauspisteelle mahdollistetaan olemassa olevalta muuntamolta.

Linjoilla 4 ja 40 päivittäinen operointisäde on arkipäivinä korkeintaan 261 km, lauantaisin korkeintaan 230 km ja pyhäpäivinä korkeintaan 279 km. Lataustaajuus on arkipäivinä korkeintaan 17,4 km ja lauantaisin ja pyhäpäivinä 16,4 km. Lataustaajuuden vaihtelu johtuu päätepisteen vaihtelusta Linnakaupungin päässä. Minimoitaessa tasausajat Kauppatorilla on latausaika Halisissa arkipäivinä ja lauantaisin 9 minuuttia. Tällöin tasausaika Kauppatorilla on 30 sekuntia. Pyhäpäivinä linjalle on otettava 1 lisäauto kiertoon. Tällöin linjalla on pyhäpäivinä 3 autoa kierrossa, kiertoaika on 90 minuuttia, päivittäinen operointisäde on korkeintaan 197 km ja latausaika Halisissa on 15 minuuttia. Pyhäpäivinä Kauppatorilla ei ole tasausaikaa.

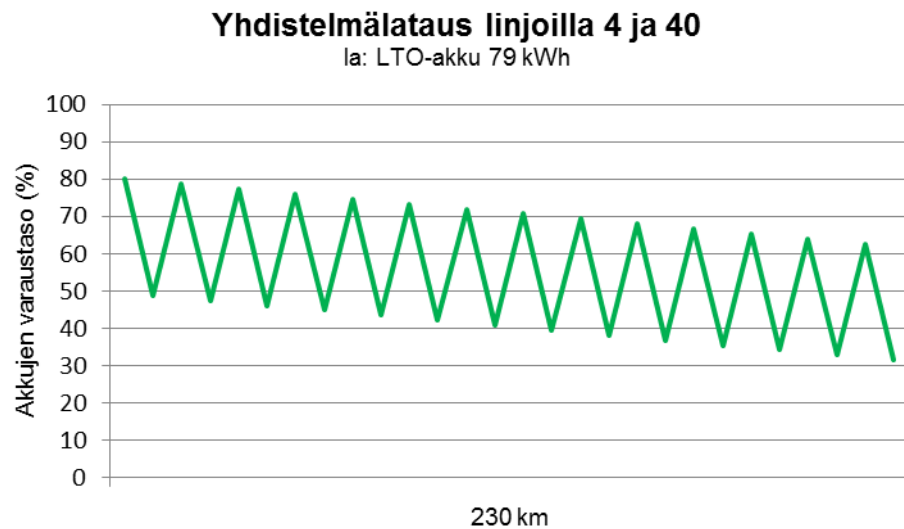
Operoinnin aikainen pikalatausteho ja sähköbussikaluston akkukapasiteetin tarve vaihtelevat linjoilla 4 ja 40 eri viikonpäivien välillä. Erot ovat suurimmat arkipäivien ja pyhäpäivien välillä lisäauton liikennöinnistä johtuen. Operoinnin aikainen pikalatausteho on arkipäivinä LTO-akkua (84 kWh) käytettäessä 167 kW ja LFP-akkua (151 kWh) käytettäessä 151 kW. Lauantaisin pikalatausteho on LTO-akkua (79 kWh) käytettäessä 157 kW ja LFP-akkua (141 kWh) käytettäessä 141 kW. Pyhäpäivinä pikalatausteho on LTO-akkua (52 kWh) käytettäessä 98 kW ja LFP-akkua (91 kWh) käytettäessä 91 kW. Varikkolatausteho on arkipäivinä ja lauantaisin LTO-akkua käytettäessä noin 40 kW (1 h) ja LFP-akkua käytettäessä noin 35 kW (2 h). Varikkolatausteho on pyhäpäivinä LTO-akkua käytettäessä noin 25 kW (1 h) ja LFP-akkua käytettäessä noin 45 kW (1 h).

Yhdistelmälatauskonseptin käyttö edellä mainittuja lataustehoja ja akkukapasiteetteja käyttäen edellyttää linjoilla 4 ja 40 arkipäivinä vähintään 9 minuutin latausta 17,4 km välein, lauantaisin vähintään 9 minuutin latausta 16,4 km välein ja pyhäpäivinä vähintään 15 minuutin latausta 16,4 km välein. Jos linjojen suunnitellut latausajat eivät toteudu, on linjoilla 4 ja 40 käytettäviä pikalataustehoja kasvatettava. Pikalataustehoa kasvatettaessa on myös huomioitava suuremman akkukapasiteetin tarve. Kuvissa 30, 31 ja 32

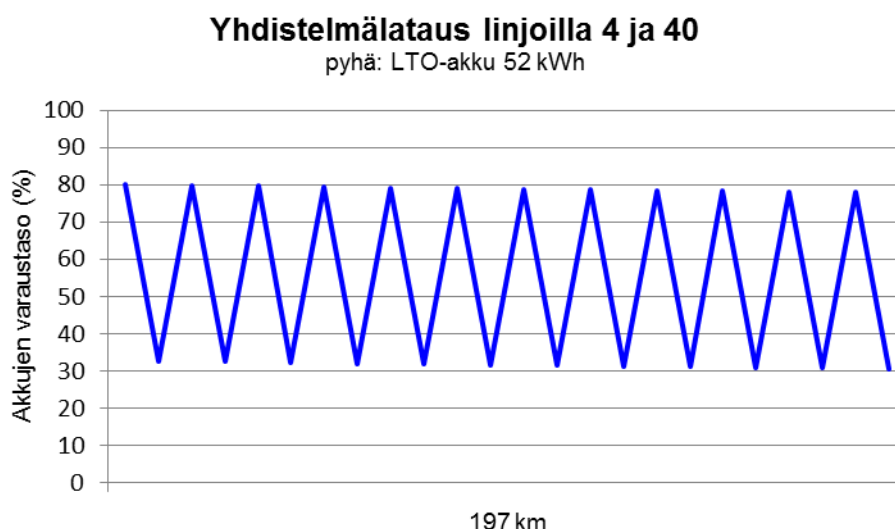
on esitetty yhdistelmälataus linjoilla 4 ja 40. Kuvassa 30 on esitetty akkujen varaustason vaihtelu arkipäivinä LTO-akkua käytettäessä, kuvassa 31 akkujen varaustason vaihtelu lauantaisin LTO-akkua käytettäessä ja kuvassa 32 akkujen varaustason vaihtelu pyhäpäivinä LTO-akkua käytettäessä.



Kuva 30 Yhdistelmälataus linjoilla 4 ja 40. Akkujen varaustason vaihtelu arkipäivinä LTO-akkua käytettäessä.



Kuva 31 Yhdistelmälataus linjoilla 4 ja 40. Akkujen varaustason vaihtelu lauantaisin LTO-akkua käytettäessä.



Kuva 32 Yhdistelmä lataus linjoilla 4 ja 40. Akkujen varaustason vaihtelu pyhäpäivinä LTO-akkuja käytettäessä.

Linjoilla 4 ja 40 purku-lataussyklin syvyys on arkipäivinä ja lauantaisin LTO-akkuja käytettäessä noin 30 % ja LFP-akkuja käytettäessä noin 20 %. Arkipäivinä purku-lataussyklejä on korkeintaan 15 ja lauantaisin korkeintaan 14. Purku-lataussyklin syvyys on pyhäpäivinä LTO-akkuja käytettäessä noin 50 % ja LFP-akkuja käytettäessä noin 30 %. Pyhäpäivinä purku-lataussyklejä on korkeintaan 12. Päivän suurimman (50 %) lataussyklin mukaan arvioitaessa LTO-akkujen elinikä on yli 15 vuotta ja LFP-akkujen elinikä noin 5 vuotta.

Linjoilla 4 ja 40 arkipäivien ja lauantain sähköbussiliikennöinti hoituu lähes samoilla pikalataustehon ja akkukapasiteetin arvoilla. Pyhäpäivinä pikalatausteho sekä akkukapasiteetti ovat kuitenkin huomattavasti pienemmät. Tämä johtuu lisääuton liikennöinnistä. Lisäauto mahdollistaa pyhäpäivinä jopa 15 minuutin latauksen 16,4 km välein, mikä on kuusi minuuttia enemmän kuin arkipäivinä ja lauantaisin. Huonona puolena pyhäpäivien sähköbussiliikennöinnissä ovat kuitenkin lisäauton aiheuttamat kustannukset. Linjojen 4 ja 40 sähköbussikalusto ja latausinfrastruktuuri kannattaa mitoittaa arkipäivien yhdistelmä latauskonseptin mukaisesti. Tällöin linjoilla voidaan liikennöidä sähköbussien viikon jokaisena päivänä.

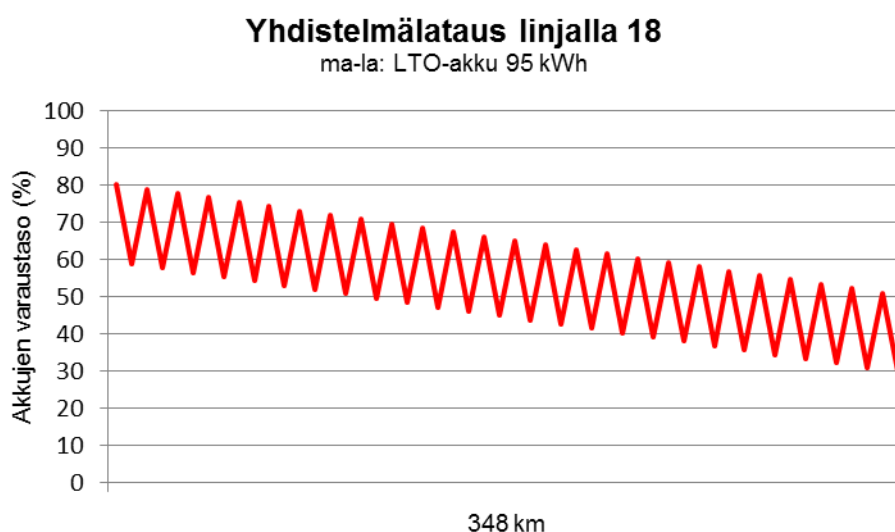
6.2.4. Linja 18

Linjan 18 sähköistäminen yhdistelmä latauskonseptia käyttäen vaatii latauspisteen perustamista molemmille linjan kääntöpaikoille. Toinen latauspisteistä sijaitsee Runosmäessä ja toinen Harituussa. Runosmäen kääntöpaikan välittömässä läheisyydessä ei ole muuntamo, mutta sähkönsyöttö latauspisteelle on kuitenkin mahdollistettavissa ongelmitta. Latauspistettä varten on kaivettava noin 170 metriä uutta kaapelia. Latauspisteen perustaminen Harittuun on hyvin pieni urakka. Turku Energialla on muuntamo linjan 18 nykyisen kääntöpaikan läheisyydessä ja latauspisteen perustaminen vaatii ainoastaan uuden kaapelin asentamista muuntamolta latauspisteelle.

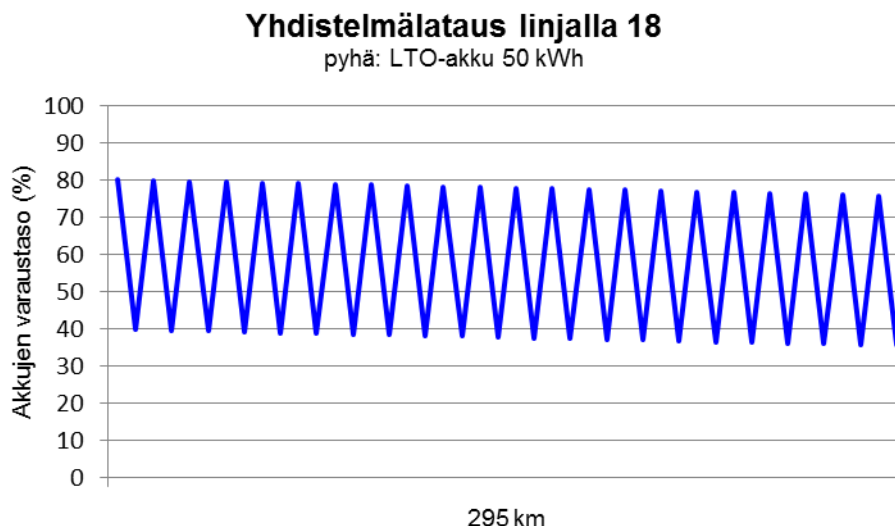
Linjalla 18 päivittäinen operointisäde on arkipäivinä ja lauantaisin korkeintaan 348 km ja pyhäpäivinä korkeintaan 375 km. Lataustaajuus on jokaisena viikonpäivänä 13,4 km. Minimoitaessa tasausajat Kauppatorilla on latausaika arkipäivinä ja lauantaisin sekä Runosmäessä että Haritussa 6 minuuttia. Tällöin tasausaika Kauppatorilla on 30 sekuntia. Pyhäpäivinä linjalle on otettava 1 lisäauto kiertoon. Tällöin linjalla on pyhäpäivinä 5 autoa kierrossa, kiertoaika on 100 minuuttia, päivittäinen operointisäde on korkeintaan 295 km ja latausaika on sekä Runosmäessä että Haritussa 12 minuuttia. Pyhäpäivinä Kauppatorilla ei ole tasausaikaa.

Operoinnin aikaisen pikalataustehon ja akkukapasiteetin tarve on hyvin erisuuruinen pyhäpäivinä kuin arkipäivinä ja lauantaisin. Ero johtuu lisäauton liikennöinnistä pyhäpäivinä. Arkipäivinä ja lauantaisin operoinnin aikainen pikalatausteho on LTO-akkua (95 kWh) käytettäessä 190 kW ja LFP-akkua (175 kWh) käytettäessä 175 kW. Pyhäpäivinä operoinnin aikainen pikalatausteho on LTO-akkua (50 kWh) käytettäessä 100 kW ja LFP-akkua (95 kWh) käytettäessä 95 kW. Varikkolatausteho on arkipäivinä ja lauantaisin LTO-akkua käytettäessä noin 50 kW (1 h) ja LFP-akkua käytettäessä noin 45 kW (2 h). Varikkolatausteho on pyhäpäivinä LTO-akkua käytettäessä noin 25 kW (1 h) ja LFP-akkua käytettäessä noin 50 kW (1 h).

Yhdistelmälatauskonseptin käyttö edellä mainittuja lataustehoja ja akkukapasiteetteja käyttäen edellyttää linjalla 18 arkipäivinä ja lauantaisin vähintään 6 minuutin latausta 13,4 km välein ja pyhäpäivinä vähintään 12 minuutin latausta 13,4 km välein. Jos linjan suunnitellut latausajat eivät toteudu, on linjalla 18 käytettäviä pikalataustehoja kasvatettava. Pikalataustehoa kasvatettaessa on myös huomioitava suuremman akkukapasiteetin tarve. Kuvissa 33 ja 34 on esitetty yhdistelmälataus linjalla 18. Kuvassa 33 on esitetty akkujen varaustason vaihtelu arkipäivinä ja lauantaisin LTO-akkua käytettäessä ja kuvassa 34 akkujen varaustason vaihtelu pyhäpäivinä LTO-akkua käytettäessä.



Kuva 33 Yhdistelmälataus linjalla 18. Akkujen varaustason vaihtelu arkipäivinä ja lauantaisin LTO-akkua käytettäessä.



Kuva 34 Yhdistelmä lataus linjalla 18. Akkujen varaustason vaihtelu pyhäpäivinä LTO-akkuja käytettäessä.

Linjalla 18 purku-lataussyklin syvyys on arkipäivinä ja lauantaisin LTO-akkuja käytettäessä noin 20 % ja LFP-akkuja käytettäessä noin 10 %. Arkipäivinä ja lauantaisin purku-lataussyklejä on korkeintaan 26. Purku-lataussyklin syvyys on pyhäpäivinä LTO-akkuja käytettäessä noin 40 % ja LFP-akkuja käytettäessä noin 20 %. Pyhäpäivinä purku-lataussyklejä on korkeintaan 22. Päivän suurimman (50 %) lataussyklin mukaan arvioitaessa LTO-akkujen elinikä on yli 15 vuotta ja LFP-akkujen elinikä noin 5 vuotta.

Pyhäpäivinä linjan 18 pikalataustehon ja akkukapasiteetin tarve on huomattavasti pienempi kuin arkipäivinä ja lauantaisin. Tämä johtuu lisäauton liikennöinnistä. Lisäauto mahdollistaa pyhäpäivinä jopa 12 minuutin latauksen 13,4 km välein, mikä on kuusi minuuttia enemmän kuin arkipäivinä ja lauantaisin. Huonona puolena pyhäpäivien sähköbussiliikennöinnissä ovat kuitenkin lisäauton aiheuttamat kustannukset. Linjan 18 sähköbussikalusto ja latausinfrastruktuuri kannattaa mitoittaa arkipäivien ja lauantaan yhdistelmä latauskonseptin mukaisesti. Tällöin linjoilla voidaan liikennöidä sähköbussien viikon jokaisena päivänä. Nykyään linjalla 18 liikennöidään telibusseja ja tästä johtuen linjan sähköistäminen pienentää linjan matkustajakapasiteettia.

6.3 Vaihtoehtoisten pilottilinjojen kustannukset

Vaihtoehtoisten pilottilinjojen kustannuksia tutkitaan sähköbussipilotin aloituskustannusten ja linjan sähköistämisen taloudellisen kannattavuuden kannalta. Lisäksi tutkitaan vuosittaisia liikennöintikustannuksia pilottilinjoilla tilanteessa, jossa linjalla liikennöi vain yksi sähköbussi. Sähköbussipilotin aloituskustannuksissa huomioidaan latausinfrastruktuurin ja sähköbussikaluston hankintakustannukset sekä sähköverkon rakentamisesta aiheutuvat kustannukset. Linjoilla 1H ja 18 latausinfrastruktuurin hankintakustannuksiin sisältyy kaksi pikalatauspistettä ja sähköbussikaluston hankintakustannuksiin yksi sähköbussi. Linjoilla 3, 30, 4 ja 40 latausinfrastruktuurin hankintakustannuksiin

sisältyy yksi pikalatauspiste ja sähköbussikaluston hankintakustannuksiin yksi sähköbussi.

Latausinfrastruktuurin hankintakustannuksiin ei ole laskettu mukaan varikkolatausinfrastruktuurin kustannuksia. Varikkolatausinfrastruktuurin kustannukset on jätetty kustannuslaskelmien ulkopuolelle, koska sähköbussiliikennöinti voidaan mahdollistaa vaihtoehtoisilla pilottilinjoilla myös ilman varikkolatausta. Jos varikkolatausinfrastruktuuri halutaan kuitenkin hankkia, on se mahdollista hyvin pienin kustannuksin. Korkeintaan 50 kW kaapelilataus voidaan mahdollistaa varikolla jakeluverkkoon liitettyä teollisuuskaapelia käyttäen noin 5000 euron hankintakustannuksilla.

Vaihtoehtoisten pilottilinjojen sähköistämisen taloudellista kannattavuutta tutkitaan vertailemalla sähköbussiliikennöinnin kustannuksia dieselbussiliikennöinnin kustannuksiin. Vaihtoehtoisten pilottilinjojen taloudellinen kannattavuus on laskettu tilanteessa, jossa koko joukkoliikennelinja on sähköistetty. Näin saadaan selville millä linjoilla on taloudellisesti kannattavaa siirtyä nykyisestä dieselbussiliikennöinnistä sähköbussiliikennöintiin. Sähköbussiliikennöinnin kustannuksissa on huomioitu latausinfrastruktuuri, sähköverkon rakentaminen, sähköbussikalusto, sähkönkulutus, sähkönjakeluun liittyvä tehomaksu sekä huollon, renkaiden ja varaosien aiheuttamat kustannukset. Lisäksi on huomioitu mahdollisesta lisääauton tarpeesta ja akkujen vaihtamisesta aiheutuvat kustannukset. Dieselbussiliikennöinnin kustannuksissa on huomioitu dieselbussikalusto, polttoainekulut sekä huollon, renkaiden ja varaosien aiheuttamat kustannukset.

Sähköbussikaluston hinta lasketaan kustannuslaskelmissa dieselbussikaluston hinnan sekä LTO- ja LFP-akkujen hinnan perusteella. Kustannuslaskelmissa sähköbussikaluston oletetaan olevan ilman akkukapasiteettia samanhintainen dieselbussikaluston kanssa. Sähköbussikaluston hinta on tällöin dieselbussikaluston hinta plus sähköbussin akkukapasiteetin hinta. Näin ollen sähköbussikaluston hinta määräytyy linjakohtaisesti tarvittavan akkukapasiteetin mukaan. Kustannuslaskelmissa oletetaan sähkö- ja dieselbussikaluston käyttöiän olevan 15 vuotta ja latausinfrastruktuurin käyttöiän olevan 30 vuotta (Tuomas Humalajoki 2014).

Lisääauton kustannukset sisältävät lisääauton energiankulutuksesta sekä huollosta, renkaista ja varaosista aiheutuvat kustannukset. Lisäksi lisääauton kustannuksissa on huomioitu linja-auton kuljettajan tuntipalkka. Akkujen vaihtamisesta aiheutuvat kustannukset on huomioitu kustannuslaskelmissa, jos akkujen elinikä on alle 15 vuotta. Akkujen eliniän ollessa alle 15 vuotta sähköbussin akut on vaihdettava ennen kuin ilmenee tarvetta ostaa uusi sähköbussikalusto. Akkujen vaihtamisesta aiheutuvat kustannukset on sisällytetty kustannuslaskelmissa sähköbussiliikennöinnin vuosittaisiin liikennöintikustannuksiin.

Sähköbussiliikennöinnin kustannukset perustuvat asiantuntija-arvioihin latausinfrastruktuurin ja akkukapasiteetin hankintakustannuksista sekä Turku Energian tietoihin sähköverkon rakentamisen ja sähkön jakelun kustannuksista. Kustannuslaskelmissa on käytetty sähköbussiliikennöinnin sähkönkulutuksena 1,5 kWh/km. Dieselbussiliiken-

nöinnin kustannukset perustuvat SL-Autolinjojen ja Veolia Transport Finland Osakeyhtiön tietoihin dieselbussin kulutuksesta ja dieselin hinnasta. Huollon, renkaiden ja varaosien aiheuttamat kustannukset perustuvat VTT:n arvioon. Vaihtoehtoisten pilottilinjojen taloudellista kannattavuutta laskettaessa kustannuslaskelmissa on huomioitu myös dieselbussien hankintakustannukset olettaen, että sähköbussikalusto hankitaan normaalin kaluston uusimisen yhteydessä.

Vaihtoehtoisten pilottilinjojen kustannukset on laskettu taulukossa 25 esitettyjen sähkö- ja dieselbussiliikennöinnin kustannusten perusteella. Taulukossa 26 on esitetty sähköbussipilotin aloituskustannukset vaihtoehtoilla pilottilinjoilla. Taulukossa 27 on esitetty vuosittaiset liikennöintikustannukset vaihtoehtoilla pilottilinjoilla tilanteessa, jossa linjalla liikennöi vain yksi sähköbussi. Taulukossa 28 on esitetty vaihtoehtoisten pilottilinjojen hankinta- ja liikennöintikustannukset sekä sähkö- että dieselbussiliikennöintiä käytettäessä. Kustannuslaskelmissa on käytetty hyväksi taulukoissa 23 ja 24 esitettyjä vaihtoehtoisten pilottilinjojen tietoja.

Taulukkoon 26 on merkattu vihreällä kuinka paljon pienemmät sähköbussipilotin aloituskustannukset linjalla 1H ovat jos sähköbussiliikennöinti mitoitetaan arkipäivien ja lauantain yhdistelmälatauskonseptin mukaisesti ja punaisella kuinka paljon suuremmat sähköbussipilotin aloituskustannukset ovat jos sähköbussikaluston akkutyypinä käytetään LTO-akkua. Taulukkoon 27 on merkattu vihreällä kuinka paljon pienemmät vuosittaiset liikennöintikustannukset vaihtoehtoilla pilottilinjoilla ovat kun sähköbussikaluston akkutyypinä käytetään LTO-akkua. Taulukkoon 28 on merkattu punaisella kuinka paljon suuremmat sähköbussiliikennöinnin hankintakustannukset ovat verrattuna dieselbussiliikennöinnin hankintakustannuksiin ja vihreällä kuinka paljon pienemmät sähköbussiliikennöinnin liikennöintikustannukset ovat verrattuna dieselbussiliikennöinnin liikennöintikustannuksiin.

Taulukko 25 Sähkö- ja dieselbussiliikennöinnin kustannukset. (Arto Ahonen 2014; SL-Autolinjat 2014; Turku Energia; Veolia Transport Finland Oy 2014; VTT 2013)

	Sähkö	Diesel
Pikalatauspiste	400 000 €	0 €
Sähköverkon rakentaminen	174 €/kW	0 €
Kalusto	300 000 € + akkukapasiteetin hinta	300 000 €
Energia	0,128 €/km	0,462 €/km
Tehomaksu	99,2 €/kk + 3,4 €/kW/kk	0 €
Huolto, renkaat ja varaosat	0,2 €/km	0,25 €/km
Lisäauto	0,128 €/km + 0,2 €/km + 19,2 €/h	0,462 €/km + 0,25 €/km + 19,2 €/h
Akkujen vaihto	LTO-akku: 2 000 €/kWh LFP-akku: 1 000 €/kWh	0 €

Taulukko 26 Sähköbussipilotin aloituskustannukset vaihtoehtoisilla pilottilinjoilla.

Linja	Akkutyypppi	Sähköbussi- liikennöinti	Latausinfra- struktuuuri	Sähköverkon rakentaminen	Sähköbussi- kalusto	YHT.
1H	LTO	ma-la	800 000	54 984	458 000	1 312 984
		ma-su	800 000	92 916	568 000	1 460 916
		erotus	0	-37 932	-110 000	-147 932
	LFP	ma-la	800 000	51 156	447 000	1 298 156
		ma-su	800 000	84 216	542 000	1 426 216
		erotus	0	-33 060	-95 000	-128 060
	erotus	-	0	6 264	18 500	24 764
3, 30	LTO	ma-su	400 000	25 926	450 000	875 926
	LFP	ma-su	400 000	23 490	435 000	858 490
	erotus	-	0	2 436	15 000	17 436
4, 40	LTO	ma-su	400 000	29 058	468 000	897 058
	LFP	ma-su	400 000	26 274	451 000	877 274
	erotus	-	0	2 784	17 000	19 784
18	LTO	ma-su	800 000	66 120	490 000	1 356 120
	LFP	ma-su	800 000	60 900	475 000	1 335 900
	erotus	-	0	5 220	15 000	20 220

Kaikkein pienimmät sähköbussipilotin aloituskustannukset ovat linjoilla 3 ja 30 sekä linjoilla 4 ja 40. Linjojen 3, 30, 4 ja 40 pienet sähköbussipilotin aloituskustannukset verrattuna muiden vaihtoehtoisten pilottilinjojen kustannuksiin mahdollistaa vain yhden latauspisteen hankintatarve. Linjoilla 4 ja 40 sähköbussipilotin aloituskustannukset ovat noin 20 000 € suuremmat kuin linjoilla 3 ja 30. Suuremmat aloituskustannukset linjoilla 4 ja 40 johtuvat suuremmasta akkukapasiteetin ja pikalataustehon tarpeesta.

Kaikkein suurimmat sähköbussipilotin aloituskustannukset ovat linjoilla 1H ja 18. Linjojen 1H ja 18 suuret sähköbussipilotin aloituskustannukset johtuvat kahden latauspisteen hankintatarpeesta. Kahden latauspisteen hankintatarpeesta johtuen latausinfrastruktuurin hankintakustannukset sekä sähköverkon rakentamisen kustannukset ovat kaksinkertaisia linjojen 3, 30, 4 ja 40 kustannuksiin verrattuna. Lisäksi linjoilla 1H ja 18 sähköbussikaluston hankintakustannukset ovat kalliimmat, kun sähköbussien liikennöidään viikon jokaisena päivänä. Kalliimpi sähköbussikalusto johtuu suuremmasta akkukapasiteetin tarpeesta.

Linjalla 1H sähköbussipilotin aloituskustannukset vaihtelevat suuresti riippuen siitä mitoitetaanko linjan 1H sähköbussiliikennöinti arkipäivien ja lauantain vai pyhäpäivien yhdistelmälatauskonseptin mukaisesti. Linjan 1H mitoittaminen pyhäpäivien yhdistelmälatauskonseptin mukaisesti kasvattaa linjan sähköbussipilotin aloituskustannuksia molempia akkutyyppijä käytettäessä yli 100 000 €. Merkittävä kustannusten kasvu johtuu pyhäpäivien suuresta akkukapasiteetin ja pikalataustehon tarpeesta. Pyhäpäivinä linjalla 1H tarvittava akkukapasiteetti ja pikalatausteho ovat lähes kaksinkertaisia arkipäivinä ja lauantaisin tarvittaviin akkukapasiteetin ja pikalataustehon arvoihin verrattu-

na. Tarvittavaa akkukapasiteettia ja pikalataustehoa voidaan kuitenkin pienentää muuttamalla linjan kalustokiertoa.

LTO-akun hinta on kaksinkertainen LFP-akun hintaan verrattuna. Merkittävästä akkutyypin kustannuserosta huolimatta sähköbussipilotin aloituskustannuksissa ei ole merkittäviä eroja eri akkutyypin välillä. Tämä johtuu siitä, että LTO-akut pystyvät vastaanottamaan huomattavasti suuremman lataustehon kuin LFP-akut. LTO-akkuja käytettäessä akkukapasiteetti voidaan pitää huomattavasti pienempänä samaa lataustehoa käytettäessä. LTO-akkuja käytettäessä huomattavasti pienempi akkukapasiteetti kompensoi kalliimmat akkutyypin hankintakustannukset.

Pelkät sähköbussipilotin aloituskustannukset huomioiden halvin sähköbussipilotti on toteuttaa linjoilla 3 ja 30. Lähes yhtä pieniin aloituskustannuksiin linjojen 3 ja 30 kanssa ylsivät linjat 4 ja 40. Kalleinta sähköbussipilotti on toteuttaa linjalla 1H, kun sähköbussiliikennöinti mitoitetaan pyhäpäivien yhdistelmälatauskonseptin mukaisesti. Pelkkien sähköbussipilotin aloituskustannusten tarkastelu ei kuitenkaan riitä kertomaan vaihtoehtoisten pilottilinjojen taloudellista kannattavuutta, vaan linjojen kustannuksissa on huomioitava myös sähköbussiliikennöinnin liikennöintikustannukset. Taulukossa 27 on esitetty vuosittaiset liikennöintikustannukset vaihtoehtoisilla pilottilinjoilla tilanteessa, jossa linjalla liikennöi vain yksi sähköbussi.

Taulukko 27 Vuosittaiset liikennöintikustannukset vaihtoehtoisilla pilottilinjoilla tilanteessa, jossa linjalla liikennöi vain yksi sähköbussi.

Linja	Akkutyyppi	Sähköbussi- liikennöinti	Energia	Tehomaksu	Huolto, renkaat ja varaosat	Lisäauto	Akkujen vaihto	YHT.
1H	LTO	ma-pe	11 554	9 762	18 014	0	0	39 329
		la	2 201	2 006	3 432	0	0	7 640
		pyhä	3 125	3 777	4 872	0	0	11 774
		YHT.	16 880	15 545	26 318	0	0	58 743
	LFP	ma-pe	11 554	9 140	18 014	0	22 366	61 073
		la	2 201	1 878	3 432	0	4 597	12 109
		pyhä	3 125	3 442	4 872	0	5 304	16 743
		YHT.	16 880	14 460	26 318	0	32 267	89 924
	erotus	-	0	1 085	0	0	-32 267	-31 181
3, 30	LTO	ma-pe	6 945	5 039	10 828	0	0	22 813
		la	1 247	1 036	1 945	0	0	4 228
		pyhä	1 778	1 195	2 772	0	0	5 745
		YHT.	9 971	7 270	15 545	0	0	32 785
	LFP	ma-pe	6 945	4 643	10 828	0	12 477	34 893
		la	1 247	954	1 945	0	2 564	6 711
		pyhä	1 778	1 101	2 772	0	2 959	8 610
		YHT.	9 971	6 698	15 545	0	18 000	50 214
	erotus	-	0	571	0	0	-18 000	-17 429

4, 40	LTO	ma-pe	5 118	4 013	7 979	0	0	17 109
		la	3 208	2 539	5 002	0	0	10 749
		pyhä	2 147	853	3 348	29 199	0	35 547
		YHT.	10 473	7 405	16 329	29 199	0	63 406
	LFP	ma-pe	5 118	3 686	7 979	0	10 094	26 876
		la	3 208	2 321	5 002	0	6 729	17 261
		pyhä	2 147	806	3 348	29 199	3 310	38 810
		YHT.	10 473	6 812	16 329	29 199	20 133	82 947
	erotus	-	0	592	0	0	-20 133	-19 541
18	LTO	ma-pe	9 082	11 572	14 160	0	0	34 814
		la	2 055	2 378	3 203	0	0	7 636
		pyhä	2 678	1 537	4 176	33 299	0	41 690
		YHT.	13 815	15 487	21 539	33 299	0	84 140
	LFP	ma-pe	9 082	10 723	14 160	0	16 174	50 139
		la	2 055	2 204	3 203	0	3 324	10 786
		pyhä	2 678	1 470	4 176	33 299	3 836	45 459
		YHT.	13 815	14 397	21 539	33 299	23 333	106 384
	erotus	-	0	1 090	0	0	-23 333	-22 243

Vuosittaisten liikennöintikustannusten erot vaihtoehtoisten pilottilinjojen välillä ovat merkittäviä. Kaikkein pienimmät vuosittaiset liikennöintikustannukset ovat linjoilla 3 ja 30 ja suurimmat linjalla 18. Linjan 18 sähköbussiliikennöinnin liikennöintikustannukset ovat yli kaksinkertaiset linjojen 3 ja 30 liikennöintikustannuksiin verrattuna. Toiseksi pienimmät liikennöintikustannukset ovat LFP-akkua käytettäessä linjoilla 4 ja 40 ja LTO-akkua käytettäessä linjalla 1H. Linjojen 4, 40 ja 18 sähköbussiliikennöinnin liikennöintikustannuksia kasvattaa huomattavasti lisääauton tarve pyhäpäivinä.

Kaikilla vaihtoehtoisilla pilottilinjoilla vuosittaiset liikennöintikustannukset ovat kuitenkin huomattavasti pienemmät LTO-akkua käytettäessä kuin LFP-akkua käytettäessä. Pienemmät liikennöintikustannukset LTO-akkua käytettäessä johtuvat LFP-akun lyhyestä eliniästä ja akkujen vaihtamistarpeesta. LFP-akun elinikä ei ole yhdelläkään vaihtoehtoisella pilottilinjalla tarpeeksi pitkä, jotta akkujen vaihtamistarvetta ei olisi. Vaihtoehtoisilla pilottilinjoilla LFP-akut tulee vaihtaa kaksi kertaa sähköbussikaluston käyttöiän aikana, mutta LTO-akkuja käytettäessä akkujen vaihtamistarvetta ei ole.

LTO-akkua käytettäessä sähköbussipilotin aloituskustannukset ovat kaikilla vaihtoehtoisilla pilottilinjoilla suuremmat, mutta vuosittaiset liikennöintikustannukset ovat kuitenkin merkittävästi pienemmät. Tästä päätellen investointi huomattavasti halvempiin LFP-akkuihin kostaatuu kuitenkin merkittävästi suuremmilla liikennöintikustannuksilla. Investointi kalliimpiin LTO-akkuihin taas mahdollistaa merkittävästi pienemmät liikennöintikustannukset. Taloudellisesti kannattavimman linjan selvittämiseksi on taulukkoon 28 laskettu vielä kaikkien vaihtoehtoisten pilottilinjojen hankinta- ja liikennöintikustannukset sekä sähkö- että dieselbussiliikennöintiä käytettäessä.

Vaihtoehtoisten pilottilinjojen hankinta- ja liikennöintikustannukset on laskettu tilanteessa, jossa koko joukkoliikennelinja on sähköistetty. Linjoille on laskettu kustannukset erikseen riippuen siitä liikennöidäänkö linjalla vain arkipäivinä ja lauantaisin vai liikennöidäänkö linjalla viikon jokaisena päivänä. Viikon jokaisena päivänä liikennöitäessä linjojen 1H, 3 ja 30 sähköbussiliikennöinti on mitoitettu pyhäpäivien yhdistelmälaustauskonseptin mukaisesti, linjojen 4 ja 40 sähköbussiliikennöinti arkipäivien yhdistel-

mälatauskonseptin mukaisesti ja linjan 18 sähköbussiliikennöinti arkipäivien ja lauantain yhdistelmälatauskonseptin mukaisesti. Linjan 1H taloudellista kannattavuutta voidaan parantaa linjan pyhäpäivien kalustokiertoa muuttamalla. Tällöin linjan sähköbussiliikennöinti voidaan mitoittaa tästä työstä poiketen arkipäivien ja lauantain yhdistelmälatauskonseptin mukaisesti.

Taulukko 28 *Vaihtoehtojen pilottilinjojen hankinta- ja liikennöintikustannukset sekä sähkö- että dieselbussiliikennöintiä käytettäessä.*

Linja	Bussi	Akkutyypppi	Sähköbussiliikennöinti	Latausinfrastrukturi	Sähköverkon rakentaminen	Kalusto	YHT.
1H	sähkö	LTO	ma-la	800 000	54 984	1 832 000	2 686 984
			ma-su	800 000	92 916	2 272 000	3 164 916
		LFP	ma-la	800 000	51 156	1 788 000	2 639 156
			ma-su	800 000	84 216	2 168 000	3 052 216
	diesel		ma-la	0	0	1 200 000	1 200 000
			ma-su	0	0	1 200 000	1 200 000
	erotus	LTO	ma-la	800 000	54 984	632 000	1 486 984
			ma-su	800 000	92 916	1 072 000	1 964 916
		LFP	ma-la	800 000	51 156	588 000	1 439 156
			ma-su	800 000	84 216	968 000	1 852 216

Linja	Bussi	Akkutyypppi	Sähköbussiliikennöinti	Energia	Tehomaksu	Huolto, renkaat ja varaosat	Lisäauto	Akkujen vaihto	YHT.	Takaisinmaksuaika (a)
1H	sähkö	LTO	ma-la	55 021	11 768	85 782	0	0	152 571	9,5 (LTO ma-la)
			ma-su	61 271	15 545	95 526	0	0	172 342	
		LFP	ma-la	55 021	11 018	85 782	0	78 400	230 221	11,5 (LTO ma-su)
			ma-su	61 271	14 460	95 526	0	129 067	300 324	
	diesel		ma-la	198 157	0	107 228	0	0	305 385	27,0 (LFP ma-la)
			ma-su	220 666	0	119 408	0	0	340 074	
	erotus	LTO	ma-la	-143 137	11 768	-21 446	0	0	-152 814	> 30 (LFP ma-su)
			ma-su	-159 395	15 545	-23 882	0	0	-167 732	
		LFP	ma-la	-143 137	11 018	-21 446	0	78 400	-75 164	
			ma-su	-159 395	14 460	-23 882	0	129 067	-39 750	

Linja	Bussi	Akkutyypppi	Sähköbussiliikennöinti	Latausinfrastrukturi	Sähköverkon rakentaminen	Kalusto	YHT.
3, 30	sähkö	LTO	ma-su	400 000	25 926	1 800 000	2 225 926
		LFP	ma-su	400 000	23 490	1 740 000	2 163 490
	diesel		ma-su	0	0	1 200 000	1 200 000
			ma-su	400 000	25 926	600 000	1 025 926
	erotus	LFP	ma-su	400 000	23 490	540 000	963 490
			ma-su	400 000	23 490	540 000	963 490

Linja	Bussi	Akkutyypppi	Sähköbussiliikennöinti	Energia	Tehomaksu	Huolto, renkaat ja varaosat	Lisäauto	Akkujen vaihto	YHT.	Takaisinmaksuaika (a)
3, 30	sähkö	LTO	ma-su	36 327	7 270	56 637	0	0	100 233	10,0 (LTO ma-su)
		LFP	ma-su	36 327	6 698	56 637	0	72 000	171 662	
	diesel		ma-su	130 831	0	70 796	0	0	201 627	> 30 (LFP ma-su)
			ma-su	-94 504	7 270	-14 159	0	0	-101 394	
	erotus	LFP	ma-su	-94 504	6 698	-14 159	0	72 000	-29 965	
			ma-su	-94 504	6 698	-14 159	0	72 000	-29 965	

Linja	Bussi	Akkutyypppi	Sähköbussiliikennöinti	Latausinfrastrukturi	Sähköverkon rakentaminen	Kalusto	YHT.
4, 40	sähkö	LTO	ma-la	400 000	29 058	2 340 000	2 769 058
			ma-su	400 000	29 058	2 340 000	2 769 058
		LFP	ma-la	400 000	26 274	2 255 000	2 681 274
			ma-su	400 000	26 274	2 255 000	2 681 274
	diesel		ma-la	0	0	1 500 000	1 500 000
			ma-su	0	0	1 500 000	1 500 000
	erotus	LTO	ma-la	400 000	29 058	840 000	1 269 058
			ma-su	400 000	29 058	840 000	1 269 058
		LFP	ma-la	400 000	26 274	755 000	1 181 274
			ma-su	400 000	26 274	755 000	1 181 274

Linja	Bussi	Akkutyypppi	Sähköbussi- liikennöinti	Energia	Tehomaksu	Huolto, renkaat ja varaosat	Lisäauto	Akkujen vaihto	YHT.	Takaisin- maksuaika (a)
4, 40	sähkö	LTO	ma-la	38 421	6 552	59 902	0	0	104 875	11,5 (LTO ma-la) 13,0 (LTO ma-su) > 30 (LFP ma-la) > 30 (LFP ma-su)
			ma-su	42 716	7 405	66 598	22 775	0	139 494	
		LFP	ma-la	38 421	6 006	59 902	0	100 667	204 996	
			ma-su	42 716	6 812	66 598	22 775	100 667	239 568	
	erotus	diesel	ma-la	138 374	0	74 878	0	0	213 251	
			ma-su	153 841	0	83 248	0	0	237 089	
		LTO	ma-la	-99 952	6 552	-14 976	0	0	-108 376	
			ma-su	-111 125	7 405	-16 650	22 775	0	-97 595	
		LFP	ma-la	-99 952	6 006	-14 976	0	100 667	-8 255	
			ma-su	-111 125	6 812	-16 650	22 775	100 667	2 480	

Linja	Bussi	Akkutyypppi	Sähköbussi- liikennöinti	Latausinfra- strukturi	Sähköverkon rakentaminen	Kalusto	YHT.
18	sähkö	LTO	ma-la	800 000	66 120	5 880 000	6 746 120
			ma-su	800 000	66 120	5 880 000	6 746 120
		LFP	ma-la	800 000	60 900	5 700 000	6 560 900
			ma-su	800 000	60 900	5 700 000	6 560 900
	erotus	diesel	ma-la	0	0	3 600 000	3 600 000
			ma-su	0	0	3 600 000	3 600 000
		LTO	ma-la	800 000	66 120	2 280 000	3 146 120
			ma-su	800 000	66 120	2 280 000	3 146 120
		LFP	ma-la	800 000	60 900	2 100 000	2 960 900
			ma-su	800 000	60 900	2 100 000	2 960 900

Linja	Bussi	Akkutyypppi	Sähköbussi- liikennöinti	Energia	Tehomaksu	Huolto, renkaat ja varaosat	Lisäauto	Akkujen vaihto	YHT.	Takaisin- maksuaika (a)
18	sähkö	LTO	ma-la	108 714	13 950	169 495	0	0	292 159	10,0 (LTO ma-la) 10,0 (LTO ma-su) > 30 (LFP ma-la) > 30 (LFP ma-su)
			ma-su	119 428	15 487	186 199	25 286	0	346 400	
		LFP	ma-la	108 714	12 927	169 495	0	280 000	571 136	
			ma-su	119 428	14 397	186 199	25 286	280 000	625 310	
	erotus	diesel	ma-la	391 533	0	211 868	0	0	603 401	
			ma-su	430 119	0	232 748	0	0	662 867	
		LTO	ma-la	-282 819	13 950	-42 374	0	0	-311 242	
			ma-su	-310 691	15 487	-46 550	25 286	0	-316 467	
		LFP	ma-la	-282 819	12 927	-42 374	0	280 000	-32 265	
			ma-su	-310 691	14 397	-46 550	25 286	280 000	-37 557	

Joukkoliikennelinjan sähköistäminen on taloudellisesti kannattavaa, jos latausinfrastruktuurin ja sähköbussikaluston takaisinmaksuaika on alle 30 vuotta. Kaikkein lyhyin latausinfrastruktuurin ja sähköbussikaluston takaisinmaksuaika on linjoilla silloin kun sähköbussin akkutyypinä käytetään LTO-akkua ja kaikkein pisin silloin kun akkutyypinä käytetään LFP-akkua. LFP-akkua käytettäessä latausinfrastruktuurin ja sähköbussikaluston takaisinmaksuaika on usein yli 30 vuotta, eikä sähköbussiliikennöinti kyseisellä linjalla kyseistä akkutyyppeä käyttäen ole taloudellisesti kannattavaa.

Kustannuslaskelmien perusteella kaikkien vaihtoehtoisten pilottilinjojen sähköistäminen on taloudellisesti kannattavaa, kun linjoilla liikennöidään viikon jokaisena päivänä ja akkutyypinä käytetään LTO-akkua. Tällöin latausinfrastruktuurin ja sähköbussikaluston takaisinmaksuaika linjalla 1H on 11,5 vuotta, linjoilla 4 ja 40 13 vuotta ja linjoilla 3, 30 ja 18 10 vuotta. Sähköbussiliikennöinti on taloudellisesti kannattavaa LFP-akkua käytettäessä ainoastaan linjalla 1H, kun sähköbusseja liikennöidään vain arkipäivinä ja lauantaisin.

Pelkkien takaisinmaksuaikojen perusteella ei kuitenkaan voida vielä tietää mikä vaihtoehtoista pilottilinjoista on taloudellisesti kaikkein kannattavin. Linjan taloudelliseen kannattavuuteen vaikuttaa takaisinmaksuaikojen lisäksi linjan sähköbussiliiken-

nöinnin liikennöintikustannussäästöt verrattuna dieselbussiliikennöintiin. Kyseiset liikennöintikustannussäästöt huomioiden on linja 18 vaihtoehtoisista pilottilinjoista taloudellisesti kaikkein kannattavin. Linjan 18 sähköistäminen mahdollistaa tämän tutkimuksen perusteella noin 135 000 euron vuosittaiset kustannussäästöt linjalla, kun sähköbussein liikennöidään viikon jokaisena päivänä.

Taloudellisesti seuraavaksi kannattavin on linja 1H. Linjan 1H sähköistäminen mahdollistaa tämän tutkimuksen perusteella noin 65 000 euron vuosittaiset kustannussäästöt linjalla. Taloudellisesti kolmanneksi kannattavimpia ovat linjat 3 ja 30. Linjojen 3 ja 30 sähköistäminen mahdollistaa tämän tutkimuksen perusteella noin 45 000 euron vuosittaiset kustannussäästöt linjoilla. Vaihtoehtoisista pilottilinjoista taloudellisesti kannattamattomimpia ovat linjat 4 ja 40. Linjojen 4 ja 40 sähköistäminen mahdollistaa tämän tutkimuksen perusteella noin 25 000 euron vuosittaiset kustannussäästöt linjoilla. Edellä mainitut kustannussäästöt ovat mahdollisia, kun sähköbussikaluston käyttöikä on 15 vuotta, latausinfrastruktuurin käyttöikä 30 vuotta ja akkutyypinä käytetään LTO-akkua.

Kustannuslaskelmista voidaan päätellä, että LTO-akun käyttö on kaikilla vaihtoehtoisilla pilottilinjoilla taloudellisesti kannattavampaa kuin LFP-akun käyttö. LTO-akun käyttö mahdollistaa taloudellisesti kannattavan sähköbussiliikennöinnin viikon jokaisena päivänä kaikilla vaihtoehtoisilla pilottilinjoilla. LFP-akun käyttö on taloudellisesti kannattavaa ainoastaan linjalla 1H, kun sähköbusseihin liikennöidään vain arkipäivinä ja lauantaisin.

Akkujen eliniästä ei kuitenkaan ole vielä tarkkaa tietoa ja diplomityössä esitetyt akkujen eliniät ovat vain karkeita arvioita. Jos LTO-akkujen elinikä on tässä tutkimuksessa oletettua elinikää alhaisempi ja LTO-akut on vaihdettava sähköbussikaluston käyttöiän aikana, muuttaa se olennaisesti sähköbussiliikennöinnin taloudellista kannattavuutta vaihtoehtoisilla pilottilinjoilla. Tällöin latausinfrastruktuurin ja sähköbussikaluston takaisinmaksuaika on linjoilla 1H, 4, 40 ja 18 yli 30 vuotta, eikä joukkoliikennelinjojen sähköistäminen ole taloudellisesti kannattavaa. Näin ollen linjojen 1H, 4, 40 ja 18 sähköistamisessä on akkuteknologian käytön aiheuttama taloudellinen riski.

Linjojen 3 ja 30 sähköistäminen on kuitenkin tämän tutkimuksen mukaan taloudellisesti kannattavaa, vaikka LTO-akut tulisi vaihtaa sähköbussikaluston käyttöiän aikana. Jos LTO-akkujen elinikä laskee puoleen oletetusta eliniästä, jolloin LTO-akut joudutaan vaihtamaan kerran 15 vuoden aikana, on latausinfrastruktuurin ja sähköbussikaluston takaisinmaksuaika linjoilla 3 ja 30 26,5 vuotta. Tällöin linjojen 3 ja 30 sähköistäminen mahdollistaisi noin 7 000 € vuosittaiset kustannussäästöt linjoilla. Edellä mainitut kustannussäästöt ovat mahdollisia, kun sähköbussikaluston käyttöikä on 15 vuotta, latausinfrastruktuurin käyttöikä 30 vuotta ja akkutyypinä käytetään LTO-akkua.

6.4 Ehdotus käynnistettävistä pilottilinjoista

Linjaa 1H ei ehdoteta käynnistettäväksi pilottilinjaksi, koska linjalla liikennöidään tällä hetkellä telibussein ja latauspisteiden perustaminen linjalle tuottaa pieniä ongelmia. Lisäksi linjalla on suuret sähköbussipilotin aloituskustannukset. Linja 1H on kuitenkin Turun seudun kolmanneksi potentiaalisin ja taloudellisesti toiseksi kannattavin joukkoliikennelinja sähköbussiliikennöintiin ja näin ollen sen sähköistämistä kannattaa harkita tulevaisuudessa. Linjan 1H sähköistämistä kannattaa harkita, kun latauspisteiden perustaminen molemmille linjan 1H kääntöpaikoille on mahdollista ja sähköbussikaluston matkustajakapasiteetti vastaa telibussien matkustajakapasiteettia.

Linjoja 3 ja 30 ehdotetaan käynnistettäväksi pilottilinjoiksi, koska linjat ovat ominaisuuksiltaan Turun seudun potentiaalisimpia joukkoliikennelinjoja sähköbussiliikennöintiin, linjoilla on vaihtoehtoisista pilottilinjoista kaikkein pienimmät sähköbussipilotin aloituskustannukset sekä vuosittaiset liikennöintikustannukset ja latausinfrastruktuurin ja sähköbussikaluston takaisinmaksuaika on vaihtoehtoisista pilottilinjoista kaikkein lyhyin. Lisäksi linjat 3 ja 30 ovat taloudellisesti kolmanneksi kannattavimpia joukkoliikennelinjoja sähköbussiliikennöintiin. Linjojen sähköistämisessä on myös vaihtoehtoisista pilottilinjoista pienimmät taloudelliset riskit.

Linjoja 4 ja 40 ei ehdoteta käynnistettäväksi pilottilinjoiksi, koska sähköbussiliikennöinnin mahdollistaminen vaatii lisäauton liikennöintiä linjoilla pyhäpäivinä, latausinfrastruktuurin ja sähköbussikaluston takaisinmaksuaika on linjoilla vaihtoehtoisista pilottilinjoista kaikkein pisin ja linjat ovat vaihtoehtoisista pilottilinjoista taloudellisesti kannattamattomimpia.

Linjaa 18 ei ehdoteta käynnistettäväksi pilottilinjaksi, koska linjalla liikennöidään tällä hetkellä telibussein ja sähköbussiliikennöinnin mahdollistaminen vaatii lisäauton liikennöintiä linjalla pyhäpäivinä. Lisäksi linjalla on suuret sähköbussipilotin aloituskustannukset ja vaihtoehtoisista pilottilinjoista suurimmat sähköbussiliikennöinnin liikennöintikustannukset. Linja 18 on kuitenkin Turun seudun taloudellisesti kannattavin joukkoliikennelinja sähköbussiliikennöintiin ja näin ollen sen sähköistämistä kannattaa harkita tulevaisuudessa, kun sähköbussikaluston matkustajakapasiteetti vastaa telibussin matkustajakapasiteettia.

7 PÄÄTELMÄT

Akkutyypin ominaisuuksista olennaisimmin sähköbussiliikennöintiin vaikuttaa tehoteho ja syklikesto. Suuri tehoteho mahdollistaa pienen akkukapasiteetin ja suuri syklikesto akkujen pitkän eliniän. Sähköbussiliikennöinnissä on olennaista pitää akkukapasiteetti mahdollisimman pienenä sähköbussin hankintakustannusten ja painon minimoimiseksi sekä matkustajakapasiteetin maksimoimiseksi. Akuille on hyvin tärkeä taata mahdollisimman pitkä elinikä, koska akut ovat sähköbussin kallein yksittäinen osa. Akkujen lyhyt elinikä kasvattaa merkittävästi sähköbussiliikennöinnin liikennöintikustannuksia ja voi tehdä joukkoliikennelinjan sähköistämisestä taloudellisesti kannattamatonta.

Sähköbussissa käytettävät akut ovat kuitenkin uutta teknologiaa ja tästä johtuen purku-lataussyklin syvyyden, lataustehon ja lämpötilan vaikutuksesta akun elinikään ei ole tarkkaa tietoa. Asiantuntijoiden mukaan akun elinikään merkittävimmin vaikuttava asia on purku-lataussyklin syvyys ja lataustehon ja lämpötilan vaikutus elinikään on vähäisempi. Purku-lataussyklin syvyyden vaikutuksesta akun elinikään ei kuitenkaan olla yksimielisiä ja varman tiedon puuttuessa akun elinikää on hyvin vaikea arvioida. Tästä johtuen joukkoliikennelinjojen sähköistämisessä tulee olemaan akkuteknologian käytön aiheuttama taloudellinen riski, kunnes akkujen eliniästä on saatavilla tarkempaa tietoa.

Latausmenetelmistä virroitin- ja induktiolataus ovat soveltuvia operoinnin aikaiseen pikalataukseen ja kaapelilataus on soveltuva varikkolataukseen. Kaapelilatausta ei voida hyödyntää operoinnin aikaisessa pikalatauksessa pienen lataustehon ja automaation puutteen takia. Virroitin- ja induktiolatauslaitteet ovat uutta teknologiaa ja niiden tuotanto on vasta kokeiluvaiheessa. Suurin pikalatauslaitteen hankintaan liittyvä riski on latausstandardien puuttuminen. Latausstandardien puuttuessa latauslaitteet eivät ole yhteensopivia kaikkien sähköbussien kanssa. Pikalatauslaitetta hankittaessa onkin huomioitava käytettävän sähköbussin ja latauslaitteen yhteensopivuus. Käytännössä sekä latauslaite että sähköbussiin asennettava lataustehon vastaanottava laite on hankittava samalta valmistajalta.

Vähitellen markkinoille tulee kuitenkin yrityksiä, jotka näkevät standardoinnin potentiaalin. Kyseiset yritykset kehittävät avoimia virroitinlatausjärjestelmiä, joihin tuleva virroitinlatausstandardi tulee perustumaan. Asiantuntijoiden arvion mukaan virroitinlatauslaitteiden standardointi kestää kuitenkin vielä 3-4 vuotta. Ennen latausstandardin valmistumista markkinoilla on kuitenkin todennäköisesti saatavilla virroitinlatauslaitteita, jotka noudattavat tulevaa standardia. Investointi pikalatauslaitteeseen on kuitenkin riski, sillä standardien puuttuessa kenelläkään ei ole täyttä varmuutta siitä, mitä latausjärjestelmää tuleva standardi tulee noudattamaan.

Yhdistelmälatauskonsepti on soveltuvin käyttökonsepti Turun seudun joukkoliikennejärjestelmän sähköistämiseen. Yhdistelmälatauskonseptia käytettäessä pystytään mi-

nimoimaan varikko- ja pikalatauskonseptin huonot puolet ja saavuttamaan käyttökonseptien parhaat puolet. Yhdistelmä latauskonsepti on erittäin muokkautuva ja se soveltuu monenlaisten joukkoliikennelinjojen sähköistämiseen. Yhdistelmä latauskonsepti mahdollistaa pienen akkukapasiteetin, pitkän operointisäteen, akkujen pitkän eliniän, kohtuulliset sähköbussikaluston ja latausinfrastruktuurin hankintakustannukset sekä pienet liikennöintikustannukset.

Sähköbussikalustoa on jo hyvin saatavilla, mutta kalustossa on usein vielä kehittämisen varaa. Ongelmia sähköbussikaluston suhteen muodostavat kaluston paino, olematon matkustajakapasiteetti, sähkönkulutuksen merkittävä kasvu kylmissä olosuhteissa sekä rajoittuneisuus pelkkään kaapelilatausmenetelmään. Sähköbussikalustoa hankittaessa on olennaista kiinnittää huomiota sähköbussikaluston sähkönkulutukseen, matkustajakapasiteettiin ja latausmenetelmävaihtoehtoihin. Markkinoilla on saatavilla Turun seudun joukkoliikennejärjestelmään soveltuvaa sähköbussikalustoa, mutta ennen niiden riskitöntä käyttöönottoa, on niiden soveltuvuus Suomen kylmiin liikennöintiolosuhteisiin varmistettava.

Turun seudulla sähköbussiliikennöinnin suurimpana riskinä on talvi. Kylmä ilma sekä lumi ja jää kasvattavat merkittävästi sähköajoneuvojen sähkönkulutusta. Sähkönkulutuksen kasvu kylmällä ilmalla johtuu ilmanvastuksen ja vierintävastuksen kasvamisesta sekä tienpinnan kitkakertoimen pienenemisestä. Pahimmillaan sähkönkulutus voi kasvaa jopa 100 % kylmissä olosuhteissa liikennöitäessä. Sähkönkulutusta voidaan kuitenkin pyrkiä pienentämään ajoneuvon esilämmittämällä ja käyttämällä polttoainekäyttöistä sisäilman lämmitintä. Sähkönkulutuksen kasvun lisäksi sähköbussiliikennöinti vaikeutuu kylmissä olosuhteissa akkuteknologian käytöstä johtuen. Kylmä ilma vaikeuttaa akkujen lataamista ja purkamista, mikä vaikeuttaa pika- ja yhdistelmä latauskonseptin käyttöä. Akkujen käyttö ja lataaminen kylmissä olosuhteissa voi myös lyhentää akkujen elinikää.

Kustannuslaskelmien perusteella sähköbussiliikennöinti on useilla Turun seudun joukkoliikennelinjoilla taloudellisesti kannattavampaa kuin dieselbussiliikennöinti. Sähköbussiliikennöinnin aloittaminen vaatii huomattavia alkuinvestointeja latausinfrastruktuuriin ja sähköbussikalustoon, mutta sähköbussiliikennöinnin liikennöintikustannukset ovat merkittävästi dieselbussiliikennöinnin liikennöintikustannuksia pienemmät. Kustannuslaskelmien perusteella joukkoliikennelinjan sähköistäminen voi mahdollistaa jopa satojen tuhansien eurojen vuosittaiset liikennöintikustannussäästöt linjalla. Joukkoliikennelinjasta ja akkujen eliniästä riippuen sähköbussiliikennöinti voi kuitenkin olla myös taloudellisesti kannattamatonta.

Tässä diplomityössä sähköbussiliikennöinnin kustannuksia on arvioitu karkealla tasolla, eikä uuden teknologian aiheuttamia kustannuksia ole huomioitu riittävällä tarkkuudella. Näin ollen sähköbussipilotin aloituskustannukset sekä liikennöintikustannukset pilottivaiheen aikana tulevat varmasti olemaan tässä diplomityössä arvioituja kustannuksia suuremmat. Pilottivaiheen kustannuksia nostaa uuden teknologian aiheuttama varmistelun tarve. Pilottivaiheessa ei voida luottaa siihen, että kaikki sujuu ongelmitta,

vaan on pelattava varman päälle ja otettava pelivaraa. Pelivaraa tarvitaan esimerkiksi akkukapasiteetissa ja pikalataustehossa. Pilottilinjalla täytyy olla käytössä myös ylimääräinen dieselbussi, joka korvaa sähköbussin mahdollisten ongelmien ilmentyessä.

Toisaalta sähköbussiliikennöinnin taloudellista kannattavuutta laskettaessa diplomityössä ei ole huomioitu akkuteknologian ja latausinfrastruktuurin hintojen laskua tai dieselin hinnan nousua tulevaisuudessa. Joidenkin arvioiden mukaan sähköbussseissa käytettävien akkujen hinnat voivat laskea puoleen 2020-luvulle siirryttäessä. Latausinfrastruktuurin hinnat tulevat myös todennäköisesti laskemaan kysynnän kasvun myötä. Dieselin hinnan voidaan olettaa kasvavan edellisvuosien kehityksen mukaisesti. Kyseinen hintakehitys pienentää kuilua diesel- ja sähköbussiliikennöinnin hankintakustannusten välillä ja kasvattaa kuilua diesel- ja sähköbussiliikennöinnin liikennöintikustannusten välillä, molemmissa tapauksissa sähköbussiliikennöinnille positiiviseen suuntaan. Näin ollen joukkoliikennelinjojen sähköistämisestä saatavat vuosittaiset kustannussäästöt tulevat tulevaisuudessa olemaan tässä diplomityössä esitettyjä säästöjä suuremmat.

Diplomityön tavoitteena oli löytää soveltuvin käyttökonsepti, latausmenetelmä ja akkutyyppi sekä Turun seudun potentiaalisin joukkoliikennelinja sähköbussiliikennöintiin. Tutkimuksen perusteella yhdistelmälatauskonsepti on soveltuvin käyttökonsepti, virroitinlataus on soveltuvin latausmenetelmä ja LTO-akku on soveltuvin akkutyyppi sähköbussiliikennöintiin Turun seudulla. Sähköbussikalustoa ei tarvitse varustaa LTO-akuilla, mutta on suositeltavaa, että sähköbussissa käytettävien akkujen ominaisuudet vastaavat tässä tutkimuksessa kuvattujen LTO-akkujen ominaisuuksia. Tutkimuksen perusteella Turun seudulla on useita potentiaalisia joukkoliikennelinjoja sähköbussiliikennöintiin.

Joukkoliikennelinja on potentiaalinen sähköbussiliikennöintiin, kun linjan ominaisuudet, kuten linjatyypin, linjapituus, linjanopeus, kalustokierto, kaluston määrä ja päivittäinen operointisäde, muodostavat ideaalisen yhdistelmän ja näitä ideaalisia yhdistelmiä on useita. Näin ollen potentiaalista sähköbussilinjaa ei voida kuvata tietyillä ominaisuuksilla, vaan linjan potentiaalisuus on monen muuttujan summa. Sähköbussiliikennöintiä suunniteltaessa on myös muistettava, että joukkoliikennelinjat ovat muokattavissa ja linjan potentiaalisuus sähköbussiliikennöintiin voidaan mahdollistaa hyvin pienillä linjan ominaisuuksien muutoksilla. Sähköbussiliikennöinti on aina suunniteltava linjakohtaisesti.

Joukkoliikenneliikennelinjojen ominaisuuksien perusteella potentiaalisimpia sähköbussilinjoja Turun seudulla ovat linjat 1H, 3, 30, 4, 40 ja 18. Sähköverkon kannalta latauspisteiden perustaminen on helpointa linjojen 4 ja 40 kääntöpaikalle, mutta kohtuullisella työllä latauspisteet pystytään perustamaan myös linjojen 3, 30 ja 18 kääntöpaikoille. Linjan 1H latauspisteiden perustaminen tuottaa kuitenkin pieniä ongelmia. Taloudellisesti kannattavinta sähköbussiliikennöintiä on linjalla 18. Joukkoliikennelinjojen ominaisuuksien, sähköverkon sekä linjojen taloudellisen kannattavuuden perusteella ehdotetaan käynnistettäväksi pilottilinjoiksi linjoja 3 ja 30. Lisäksi suositellaan linjojen 1H ja 18 sähköistämistä, kun sähköbussikaluston matkustajakapasiteetti vastaa telibus-

sien matkustajakapasiteettia ja latauspisteiden perustaminen molemmille linjan 1H kääntöpaikoille on mahdollista.

Linjat 3 ja 30 suositellaan sähköistettäväksi yhdistelmälatauskonseptia käyttäen. Operoinnin aikaiseen pikalataukseen käytetään virroitinlatausta ja varikkolataus voidaan haluttaessa mahdollistaa jakeluverkkoon liitetyn teollisuuskaapelin avulla. Yhdistelmälatauskonseptin mahdollistamiseksi linjojen 3 ja 30 yhteiselle kääntöpaikalle Majakkaraantaan perustetaan pikalatauspiste, jonka latausteho on 149 kW. Varikkolataus suoritetaan yön aikana korkeintaan 50 kW latausteholla. Linjoille 3 ja 30 hankitaan sähköbussikalusto, joka on yhteensopiva hankitun virroitinlatauslaitteen kanssa, jonka matkustajakapasiteetti vastaa 2-akselisen dieselbussikaluston matkustajakapasiteettia ja jonka akkujen ominaisuudet vastaavat tässä tutkimuksessa kuvattujen LTO-akkujen ominaisuuksia. Akkukapasiteetti on 75 kWh.

Yhdistelmälatauskonseptin käyttö edellä mainittuja lataustehoja ja akkukapasiteettia käyttäen edellyttää linjoilla 3 ja 30 jokaisena viikonpäivänä vähintään 5 minuutin latausta 8,9 km välein sähkönkulutuksen ollessa 1,5 kWh/km. Jos hankittavan sähköbussikaluston sähkönkulutus on tässä diplomityössä käytettyä sähkönkulutuksen arvoa suurempi tai jos linjojen suunnitellut latausajat eivät toteudu, on linjoilla 3 ja 30 käytettävää pikalataustehoa kasvatettava. Pikalataustehoa kasvatettaessa on myös huomioitava suuremman akkukapasiteetin tarve. Mahdolliset muutokset pikalataustehossa ja akkukapasiteetissa vaikuttavat latausinfrastruktuurin ja sähköbussikaluston hankintakustannuksiin sekä sähköbussiliikennöinnin liikennöintikustannuksiin.

Diplomityössä esitetyt tulokset linjojen sähköistämisestä perustuvat aikataulun mukaisen kalustokierron mahdollistamaan latausaikaan ja keskimääräiseen sähkönkulutukseen. Sähköistettävä joukkoliikennelinja suositellaan kuitenkin mitoitettavaksi todellisten latausajojen perusteella. Todelliset latausajat voidaan selvittää mittaamalla joukkoliikennelinjan todelliset tasaus- ja kääntöajat eri viikonpäivinä ja vuorokauden aikoina. Sähköbussin sähkönkulutus tulisi myös määrittää sähköistettävän joukkoliikennelinjan reittiprofiiliin perustuen, huomioiden käytettävä sähköbussikalusto, liikennöintiolosuhteet ja lämpötila liikennöinnin aikana.

Ennen sähköbussipilotin käynnistämistä suositellaan sähköbussiliikennöinnin kilpailutuksen tarkkaa suunnittelua. Sähköbussiliikennöinnin kilpailutuksen suunnitteluun sisältyy muun muassa päätös sähköbussikaluston ja latausinfrastruktuurin omistuksesta. Diplomityössä käsiteltiin pintapuolisesti uuden tekniikan ja kylmien olosuhteiden aiheuttamia riskejä sähköbussiliikennöinnille, mutta tarkan riskiarvioinnin tekeminen on suositeltavaa. Tässä diplomityössä sähköbussiliikennöinnin kustannuksia on arvioitu karkealla tasolla, eikä uuden teknologian aiheuttamia lisäkustannuksia pilottivaiheessa tai akkuteknologian ja latausinfrastruktuurin hintojen laskua tulevaisuudessa ole huomioitu riittävällä tarkkuudella. Näin ollen suositellaan pilottivaiheen kustannusten ja linjan taloudellisen kannattavuuden tarkempaa tutkimista, kun päätös sähköistettävästä joukkoliikennelinjasta sekä hankittavasta infra- ja kalustosta on tehty.

LÄHTEET

- Alanne, V. 2014. Sähköbussimatkustajien matkustuskokemus Hyvinkään asuntomessujen yleisökuljetuksissa. Laurea-ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö. Hyvinkää 4/2014. [viitattu 7.8.2014] Saatavissa: <http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/79020/Sahkobussimatkustajien%20matkustuskoke-mus%20Hyvinkaan%20asuntomessujen%20yleisokuljetuksissa.pdf?sequence=1>
- Alé EL. Rampini. [viitattu 3.4.2014] Saatavissa: http://www.rampini.it/schede/autobus/Ale_EL.pdf
- Altairnano. Products. [viitattu 29.8.2014] Saatavissa: <http://www.altairnano.com/products/powerrack/>
- Arto Ahonen. 2014. Turku Energia Sähköverkot Oy. 27.6.2014. Haastattelu.
- Batteriebus Wien. 2014. Wiener Linien. Julkaisematon lähde. 25 s.
- Battery University. Learn about Batteries. [viitattu 30.5.2014] Saatavissa: <http://batteryuniversity.com/learn/>
- Biomeri Oy. 2009. Sähköajoneuvot Suomessa – selvitys. 6.8.2009. [viitattu 30.5.2014] Saatavissa: http://www.tem.fi/files/24099/Sahkoajoneuvot_Suomessa-selvitys.pdf
- BYD. Electric Bus. [viitattu 5.4.2014] Saatavissa: <http://www.byd.com/na/auto/ElectricBus.html>
- Caetano Bus / Efacec. 2013. Cobus EL. CHAdEMO European Annual Conference 2013. Milestone toward achieving greener Europe. Antonio Guimaraes. Bryssel 19.2.2013. [viitattu 7.4.2014] Saatavissa: http://www.chademo.com/wp/wp-content/uploads/2013/02/3.Presentation_EFACEC.pdf
- Cobus 2500 EL. Caetano Bus. Grupo Salvador Caetano. [viitattu 7.4.2014] Saatavissa: <http://www.caetanobus.pt/>
- COM (2014) 15 final. Komission tiedonanto Euroopan parlamentille, neuvostolle, Euroopan talous- ja sosiaalikomitealle ja alueiden komitealle. Ilmasto- ja energiapolitiikan puitteet vuosille 2020-2030. Euroopan komissio. Bryssel 22.1.2014. [viitattu 23.2.2014] Saatavissa: <http://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/1/2014/FI/1-2014-15-FI-F1-1.Pdf>
- Ebusco Components. Ebusco. Electric Buses & Components. [viitattu 6.4.2014] Saatavissa: <http://www.ebusco.eu/en/the-components>

Ebusco Home. Edusco. Electric Buses & Components. [viitattu 6.4.2014] Saatavissa: <http://ebusco.eu/en/>

Ebusco News. Edusco. Electric Buses & Components. [viitattu 6.4.2014] Saatavissa: <http://ebusco.eu/en/news>

Ebusco. 2014. Testing electric buses in Finland's cold climate. YLE News and Radio Sweden. 20.1.2014. [viitattu 6.4.2014] Saatavissa: <http://ebusco.eu/files/Alaska-Dispatch.pdf>

Ebusco. 2013. Ebusco electric bus into service on Espoo internal route 11. HSL. 12.12.2013. [viitattu 6.4.2014] Saatavissa: http://ebusco.eu/files/HSLHRTpublication_12122013.pdf

E-move. Esite. Mennään puhtaasti bussilla. Sähköbussin pilottikokeilu Porvoossa. [viitattu 7.4.2014] Saatavissa: http://www.tetraedri.fi/easydata/customers/tetraedri/files/ajankohtaiset/mennaan_puhtaasti_bussilla_e-move_esite.pdf

Esitys jatkosuunnitteluun. 2014. Turun raitiotien ensimmäisen vaiheen yleissuunnitelma laaditaan kolmelle potentiaalisemmalle reitille: Runosmäkeen, Skanssiin ja Varissuolle. Turun kaupunki. 28.2.2014. [viitattu 5.3.2014] Saatavissa: http://www.turunraitiotie.info/Perustelut_vaiheelle1.pdf

(EY) N:o 1071/2009. Euroopan parlamentin ja neuvoston asetukset (EY) N:o 1071/2009, annettu 21 päivänä lokakuuta 2009, maantieliikenteen harjoittajan ammatin harjoittamisen edellytyksiä koskevista yhteisistä säännöistä ja neuvoston direktiivin 96/26/EY kumoamisesta. Strasbourg 21.10.2009. Euroopan unionin virallinen lehti. 14.11.2009. [viitattu 24.2.2014] Saatavissa: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:300:0051:0071:FI:PDF>

Fortum. 2014. Kotienergia. Sähköbussit tulevat. 19.3.2014. [viitattu 6.4.2014] Saatavissa: <http://www.kotienergia.fi/artikkelit/sahkobussit-tulevat>

Helsingin Sanomat. 2013. Sähköbussi karaistuu Espoossa. 11.3.2013. [viitattu 7.4.2014] Saatavissa: <http://www.hs.fi/paivanlehti/kaupunki/S%C3%A4hk%C3%B6bussi+karaistuu+Espoossa/a1362894239785>

HSL. Ohjeita ja tietoja. Palvelulinjat. [viitattu 29.1.2014] Saatavissa: <https://www.hsl.fi/ohjeita-ja-tietoja/palvelulinjat>

HSL. 2012. Tiedotteet. HSL kokeilee täyssähköbussia. 5.9.2012. [viitattu 7.4.2014] Saatavissa: <https://www.hsl.fi/uutiset/2012/hsl-kokeilee-tayssahkobussia-2644>

Inkiläinen, E., Sinisalo, M. & Tiuhonen, T. 2013. Hiilineutraalin liikkumisen mahdollisuudet Porvoossa. Oy Eero Paloheimo Ecocity Ltd. STOK raportti 10/2013. Porvoo 1/2013. [viitattu 6.8.2014] Saatavissa:

http://www.tetraedri.fi/easydata/customers/tetraedri/files/ajankohtaiset/hiilineutraalin_liikkumisen_mahdollisuudet_porvoossa.pdf

Joukkoliikennelaki 2009. Finlex. Ajantasainen lainsäädäntö. 13.11.2009/869. Versioon päivitetty joukkoliikennelain voimaantulon jälkeen voimaan tulleet lait. [viitattu 24.2.2014] Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2009/20090869>

Joukkoliikennetoimisto. 2014. Turun kaupunki. Julkaisematon lähde.

Jukka Mäkinen. 2014. ABB Oy. 26.5.2014. Haastattelu.

Samu Kukkonen & Veikko Karvonen. 2014. VTT. 5.6.2014. Haastattelu.

Kesäaikataulut. Turun seudun joukkoliikenteen kesäaikataulut. 22.4.2014-21.9.2014. Turun seudun joukkoliikenne. Turun kaupunki. 240 s.

KOM(2011) 144 lopullinen. Valkoinen kirja. Yhtenäistä Euroopan liikennealuetta koskeva etenemissuunnitelma- Kohti kilpailukykyistä ja resurssitehokasta liikennejärjestelmää. Euroopan komissio. Bryssel 28.3.2011. [viitattu 23.2.2014] Saatavissa: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2011:0144:FIN:FI:PDF>

Kävelyn ja pyöräilyn kehittämisohjelma 2010. Turun kaupunki. Turun kaupungin ympäristö- ja kaavoitusvirasto. [viitattu 1.7.2014] Saatavissa pdf: <http://www.kulkulaari.fi/fi/kavely/poliittiset-linjaukset-ja-yhteisty/edistamisohjelmat>

Luonnos. 2012. Runkobussilinjaston kehittämisohjelma vuosille 2012-2020. Luonnos 17.10.2012. Trafex Oy, Liidea Oy, Perform Oy. Lokakuu 2012. [viitattu 4.3.2014] Saatavissa: <http://www05.turku.fi/ah/jlk/2012/1023012x/Images/1188081.pdf>

LVM 2013. Liikenteen ympäristöstrategia 2013-2020. Julkaisuja 43/2013. Liikenne- ja viestintäministeriö. [viitattu 23.2.2014] Saatavissa: http://www.lvm.fi/c/document_library/get_file?folderId=2497123&name=DLFE-22545.pdf&title=Julkaisuja%2043-2013%20Ymparistostrategia

LVM 2012. Liikenne- ja viestintäministeriön hallinnonalan ilmastopoliittinen ohjelma 2009–2020. Seuranta 2012. Julkaisuja 23/2012. Liikenne- ja viestintäministeriö. [viitattu 23.2.2014] Saatavissa: http://www.lvm.fi/c/document_library/get_file?folderId=1986562&name=DLFE-18457.pdf&title=Julkaisuja%2023-2012

LVM 2009. Liikenne- ja viestintäministeriön hallinnonalan ilmastopoliittinen ohjelma 2009–2020. Ohjelmia ja strategioita 2/2009. Liikenne- ja viestintäministeriö. [viitattu 22.2.2014] Saatavissa: http://www.lvm.fi/c/document_library/get_file?folderId=440554&name=DLFE-8040.pdf&title=Ohjelmia%20ja%20strategioita%202-2009

Opaskartta. Turun karttapalvelu. [viitattu 27.1.2014] Saatavissa: <http://opaskartta.turku.fi/ims/>

Paikkatietoikkuna. Karttaikkuna. Maanmittauslaitos. Paikkatietoinfrastruktura. [viitattu 21.2.2014] Saatavissa: <http://www.paikkatietoikkuna.fi/web/fi/kartta>

Palvelutasomäärittely. 2011. Turun seudun joukkoliikenteen palvelutasomäärittely. Turun joukkoliikennettä koskevia selvityksiä. Varsinais-Suomen elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus ja Turun kaupunki. Turku 8/2011. Sivu päivitetty 20.11.2013. [viitattu 29.1.2014] Saatavissa pdf: <http://www.turku.fi/Public/default.aspx?nodeid=11937&culture=fi-FI&contentlan=1>

Plugincars. 2012. Shenzhen continues Path to Electric Fleet. Julkaistu 26.11.2012. [viitattu 6.8.2014] Saatavissa: <http://www.pluginCars.com/shenzhen-continues-rapid-path-electric-fleets-125474.html>

PSA 2007. Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EY) N:o 1370/2007, annettu 23 päivänä lokakuuta 2007, rautateiden ja maanteiden julkisista henkilöliikennepalveluista sekä neuvoston asetusten (ETY) N:o 1191/69 ja (ETY) N:o 1107/70 kumoamisesta. Strasbourg 23.10.2007. Euroopan unionin virallinen lehti. 3.12.2007. [viitattu 5.2.2014] Saatavissa: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2007:315:0001:0001:FI:PDF>

Ratapiha-alueen osayleiskaava. 25/2005. Ratapiha-alue. Turun kaupungin ympäristö- ja kaavoitusvirasto. Lainvoimainen 28.11.2009. [viitattu 4.3.2014] Saatavissa: http://ympto.turku.fi/ympakaavi/sivut/Kaavoitus/sivut/Yleiskaavoitus/sivut/kuvien_naytto.php3?Diario=8247-2005&kuvan_nimi=Lop_kartta&kuvan_tyyppi=Lop_kartta_tyyppi&taulukon_nimi=voim_t&tunniste=Di11

RekkEViDe. Assessing Range and Performance of Electric Vehicles in Nordic Driving Conditions. [viitattu 15.3.2014] Saatavissa: <http://www.nordicenergy.org/wp-content/uploads/2012/03/RekkEViDe.pdf>

RekkEViDe. 2014. Range & Performance of Electric Vehicles in Nordic Driving Conditions. Electric Transportation Portfolio. Stockholm 6.2.2014. [viitattu 15.3.2014] Saatavissa: http://www.nordicenergy.org/wp-content/uploads/2012/03/Poster_RekkEViDe.pdf

RM35. 2012. Turun kaupunkiseudun rakennemalli 2035. Pöyry Finland Oy. Loppuraportti 2.4.2012. [viitattu 5.3.2014] Saatavissa pdf: <http://www.turku.fi/public/default.aspx?contentid=332456&nodeid=17318>

Ruotsalainen, S. 2012. Ajoneuvojen ja työkoneiden sähköisen voimansiirron kehittäminen. Loppuraportti. Metropolia ammattikorkeakoulu. 26.3.2012. [viitattu 30.5.2014] Saatavissa: http://www.transec.fi/files/611/Ajoneuvojen_ja_tyokoneiden_sahkoisen_voimansiirron_kehittaminen_Loppuraportti.pdf

Selvitys etenemisestä. 2010. Selvitys bussien runkolinjaston kehittämisen etenemisestä. Turun kaupunki. 24.5.2010. [viitattu 4.3.2014] Saatavissa: <http://www05.turku.fi/ah/kh/2010/0607016x/2332112.htm>

Seminaari. 2014. Bussiliikenteen sähköistäminen – seminaari. Siemens. 20.8.2014.

Seppo Pohjanpalo. 2014. Turun Satama Oy. Sähköryhmän käyttöpäällikkö. 30.7.2014. Puhelinkeskustelu.

Siemens. Sähköbussi. [viitattu 2.4.2014] Saatavissa: <http://www.siemens.fi/fi/sahkobussi.htm>

Siemens. 2014. eBus Ladekonzepte und Zusammenspiel von Fahrzeugen und Infrastruktur. VDV Akademie. 17.2.2014. Julkaisematon lähde. 22 s.

Siemens esite. Wiener Linien Electric Bus. 12 midibuses for the city centre. siemens.com. [viitattu 3.4.2014] Saatavissa: <http://www.mobility.siemens.com/mobility/global/SiteCollectionDocuments/en/road-solutions/urban/ebus-ebtr/ebus-wiener-linien-brochure-en.pdf>

SL-Autolinjat. 26.8.2014. Puhelinkeskustelu.

Solaris. 2014 a. Urbino electric. Catalog. [viitattu 4.4.2014] Saatavissa pdf: http://www.solarisbus.com/vehicles_catalog/20/urbino-electric

Solaris. 2014 b. Low Entry. Catalog. [viitattu 4.4.2014] Saatavissa pdf: http://www.solarisbus.com/vehicles_catalog/24/low-entry

Solaris 2014 c. Urbino 12 electric. Gallery. [viitattu 4.4.2014] Kuva ladattavissa: http://www.solarisbus.com/vehicle/urbino-12-electric#goTourbino1_scene3

Solaris. 2013. Urbino. Catalog. [viitattu 4.4.2014] Saatavissa pdf: http://www.solarisbus.com/vehicles_catalog/23/urbino

South China Morning Post. 2014. China Business. Take China's public sector on an electric ride. Julkaistu 2.5.2014. [viitattu 6.8.2014] Saatavissa: <http://www.scmp.com/business/china-business/article/1501967/take-chinas-public-sector-electric-ride>

Suhonen, K. 2014. Selvitys Lahden keskustan joukkoliikennelinjastosta. Hämeen ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö. Riihimäki 2014. [viitattu 7.8.2014] Saatavissa: <http://theseus17-kk.lib.helsinki.fi/bitstream/handle/10024/70729/Oppari%20Katja%20Suhonen.pdf?sequence=1>

Talouselämä. 2013. Sähköajoneuvot. Talvella hyytynyt Veolian sähköbussi yrittää comebackia Espooseen kesällä. 12.8.2013. [viitattu 7.4.2014] Saatavissa:

<http://www.talouselama.fi/uutiset/talvella+hyytynyt+veolian+sahkobussi+yritttaa+comebackia+espooseen+kesalla/a2197963>

Teknologiateollisuus. 2013. Sähköbussien lataus puhutti Berliinissä. Julkaistu 3/2013. [viitattu 6.8.2014] Saatavissa: <http://teknologiateollisuus.fi/fi/a/sahkobussien-lataus-puhutti-berliinissa.html>

TLO. 2014. Laatulupaus. Sivu päivitetty 10.1.2014. [viitattu 10.2.2014] Saatavissa: <http://www.tlo.fi/assets/pdf/Laatulupaus.pdf>

Toimintakertomus 2012. Turun joukkoliikenne. Turun kaupunki. [viitattu 29.1.2014] Saatavissa: <http://www.e-julkaisu.fi/turun-joukkoliikenne/toimintakertomus/2012/>

Toimintakertomus 2013. Turun joukkoliikenne. Turun kaupunki. [viitattu 1.7.2014] Saatavissa: <http://www.e-julkaisu.fi/turun-joukkoliikenne/toimintakertomus/2013/>

TransEco. 2013. Suomen talvi on sähköautoille kova pala. Tiedotteet 2013. 10.10.2013. [viitattu 15.3.2014] Saatavissa: http://www.transec.fi/ajankohtaista/tiedotteet/tiedotteet_2013/suomen_talvi_on_sahko_autolle_kova_pala.281.news

Tuomas Humalajoki. 2014. Siemens Osakeyhtiö. 19.3.2014, 10.6.2014. Haastattelu.

Turku Energia. Sähkönmyyntihinnasto: Normaalihinta 1.1.2013 alkaen. [viitattu 12.7.2014] Saatavissa: http://www.turkuenergia.fi/files/1713/7034/5259/Sahkonmyyntihinnasto_01012013.pdf

Turun kaupunki. 2014 a. Seudullinen joukkoliikenne alkaa 1.7.2014. Sivu päivitetty 8.4.2014. [viitattu 22.4.2014] Saatavissa: <http://www.turku.fi/Public/default.aspx?contentid=497095&nodeid=11916>

Turun kaupunki. 2014 b. Linjan 100 aikataulut. Sivu päivitetty 23.1.2014. [viitattu 29.1.2014] Saatavissa: <http://www.turku.fi/Public/default.aspx?contentid=75454>

Turun kaupunki. 2014 c. Linjan 100 aikataulut. Kuljetukset TPS:n otteluihin Liigan pelipäivinä 2013-2014. Sivu päivitetty 23.1.2014. [viitattu 29.1.2014] Saatavissa pdf: <http://www.turku.fi/Public/default.aspx?contentid=75454>

Turun kaupunki. 2014 d. Logomon suurtapahtumat saavat oman bussilinjan. Sivu päivitetty 2.4.2014. [viitattu 25.4.2014] Saatavissa: <http://www.turku.fi/Public/default.aspx?contentid=502734&nodeid=11885>

Turun kaupunki. 2014 e. Ilmasto- ja ympäristöohjelma 2009-2013. Sivu päivitetty 5.3.2014. [viitattu 1.7.2014] Saatavissa pdf: <http://www.turku.fi/Public/default.aspx?contentid=150752&nodeid=4906>

Turun kaupunki. 2013 a. Bussit ja aikataulut. Sivu päivitetty 18.11.2013. [viitattu 9.2.2014] Saatavissa:

<http://www.turku.fi/Public/default.aspx?nodeid=11916&culture=fi-FI&contentlan=1>

Turun kaupunki. 2013 b. Aikataulut. Sivu päivitetty 29.11.2013. [viitattu 27.1.2014] Saatavissa pdf: <http://www.turku.fi/Public/default.aspx?nodeid=13398>

Turun kaupunki. 2013 c. Tulevaisuuden Turussa sähköbussit kulkevat aurinkoenergialla. Sivu päivitetty 25.10.2013. [viitattu 1.7.2014] Saatavissa:

<https://www.turku.fi/Public/?contentid=472488&nodeid=11885>

Turun kaupunki. 2012 a. Seutu- ja kaukoliikenne. Sivu päivitetty 21.5.2012. [viitattu 9.2.2014] Saatavissa:

<http://www.turku.fi/Public/default.aspx?nodeid=11918&culture=fi-FI&contentlan=1>

Turun kaupunki. 2012 b. Seutu- ja kaukoliikenne. Kuntalippusopimuslinjojen perusteet. Sivu päivitetty 21.5.2012. [viitattu 9.2.2014] Saatavissa pdf:

<http://www.turku.fi/Public/default.aspx?nodeid=11918&culture=fi-FI&contentlan=1>

Turun kaupunki. 2012 c. Laatulupaus. Sivu päivitetty 10.1.2012. [viitattu 9.2.2014] Saatavissa: <http://www.turku.fi/Public/default.aspx?nodeid=18498&culture=fi-FI&contentlan=1>

Turun kaupunki. 2012 d. Palvelulinjat. Sivu päivitetty 2.10.2012 [viitattu 29.1.2014] Saatavissa: <http://www.turku.fi/Public/default.aspx?nodeid=11935&culture=fi-FI&contentlan=1>

Turun raitiotie. Turun raitiotien yleissuunnittelu 2013-2015. Turun kaupunki, WSP Finland Oy, Ramboll Finland Oy. [viitattu 5.3.2014] Saatavissa:

<http://www.turunraitiotie.info/>

Turun raitiotien yleissuunnitelma. 2014. Turun raitiotien ensimmäisen vaiheen yleissuunnitelma. Linjausvaihtoehtojen vertailu. Turun kaupunki, WSP Finland Oy, Ramboll Finland Oy. 16.1.2014. [viitattu 5.3.2014] Saatavissa:

http://www.turunraitiotie.info/Linjausvaihtoehtojen_vertailu.pdf

Turun seudun joukkoliikenne 2020. Raportti. WSP Finland Oy. 3.6.2009. [viitattu 4.3.2014] Saatavissa pdf:

<http://www.turku.fi/Public/default.aspx?nodeid=11937&culture=fi-FI&contentlan=1>

Täytäntöönpano. 2010. Turun seudun joukkoliikenne 2020 – selvityksen täytäntöönpano. Turun kaupunki. 11.1.2010. [viitattu 4.3.2014] Saatavissa:

<http://www05.turku.fi/ah/kh/2010/0118002x/2246157.htm>

UNFCCC. 2014 a. United Nations. Framework Convention on Climate Change. Kyoto Protocol. [viitattu 22.2.2014] Saatavissa:

https://unfccc.int/kyoto_protocol/items/2830.php

UNFCCC. 2014 b. United Nations. Framework Convention on Climate Change. Meetings. Doha Climate Change Conference-November 2012. [viitattu 22.2.2014] Saatavissa: http://unfccc.int/meetings/doha_nov_2012/meeting/6815.php

United Nations. 2012. Doha Amendment to the Kyoto Protocol. Adoption of Amendment to the Protocol. Reference: C.N.718.2012.TREATIES-XXVII.7.c. Doha, 8 December 2012. [viitattu 22.2.2014] Saatavissa: <https://treaties.un.org/doc/Treaties/2012/12/20121217%2011-40%20AM/CN.718.2012.pdf>

Varsinais-Suomi. Kela. [viitattu 25.4.2014] Saatavissa: <http://www.kela.fi/orh-varsinais-suomi>

VDL Citea. VDL Bus & Coach. [viitattu 2.4.2014] Saatavissa: <http://www.vdlbuscoach.com/Producten/Openbaar-vervoer/Citea.aspx>

VDL esittely. 2014. Zero-Emission Public Transport. VDL Bus & Coach. Esittelijät Alex de Jong ja Henrik Mikkola. Turussa 18.3.2014. Julkaisematon lähde.

VDL News. 2014. VDL Bus & Coach. [viitattu 2.4.2014] Saatavissa: <http://www.vdlbuscoach.com/News/Archief.aspx>

Veolia Transport Finland Oy. 2014. Sami Ojamo. 22.8.2014. Sähköpostikeskustelu.

VNK 2009. Valtioneuvoston tulevaisuuden selonteko ilmasto- ja energiapolitiikasta: kohti vähäpäästöistä Suomea. Valtioneuvoston kanslian julkaisusarja 28/2009. Valtioneuvoston kanslia. Helsinki. [viitattu 23.2.2014] Saatavissa: <http://vnk.fi/julkaisukansio/2009/j28-ilmasto-selonteko-j29-klimat-framtidsredogorelse-j30-climate /pdf/fi.pdf>

VTT 2013. Sähköbussien käyttökonseptit ja latausjärjestelmät. ECV-eCharge esiselvitys. VTT, Technical Research Centre of Finland. Paikallisliikennepäivät 20.9.2013. Julkaisematon lähde 18 s.

YTP-1. Electric Buses. Ebusco. Electric Buses & Components. [viitattu 6.4.2014] Saatavissa: <http://www.ebusco.eu/en/electric-buses/ytp-1>

YTP-2. Electric Buses. Ebusco. Electric Buses & Components. [viitattu 6.4.2014] Saatavissa: <http://www.ebusco.eu/en/electric-buses/ytp-2>